



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
FACULDADE DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO, ATUÁRIA E CONTABILIDADE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECONOMIA – CAEN
DOUTORADO EM ECONOMIA

FRANCISCO HALYSSON VIEIRA

**VARIAÇÃO CLIMÁTICA E ECONOMIA: IMPACTOS DE LONGO PRAZO E
EFEITOS SOBRE A ATIVIDADE ECONÔMICA MUNICIPAL NO BRASIL**

FORTALEZA

2025

FRANCISCO HALYSSON VIEIRA

VARIAÇÃO CLIMÁTICA E ECONOMIA: IMPACTOS DE LONGO PRAZO E EFEITOS
SOBRE A ATIVIDADE ECONÔMICA MUNICIPAL NO BRASIL

Tese apresentada ao Programa de Pós-
Graduação em Economia da Universidade
Federal do Ceará como requisito parcial à
obtenção de título de Doutor em Economia.

Área de concentração: Economia das
Mudanças Climáticas

Orientador: Prof. Dr. Jair do Amaral Filho

Coorientador: Prof. Dr. Roberto Tatiwa Ferreira

FORTALEZA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

V715v Vieira, Francisco Halysson.

Variação Climática e Economia : Impactos de Longo Prazo e Efeitos sobre a Atividade Econômica Municipal no Brasil / Francisco Halysson Vieira. – 2025.
128 f. : il. color.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Faculdade de Economia, Administração, Atuária e Contabilidade, Programa de Pós-Graduação em Economia, Fortaleza, 2025.

Orientação: Prof. Dr. Jair do Amaral Filho.

Coorientação: Prof. Dr. Roberto Tatiwa Ferreira.

1. economia das mudanças climáticas. 2. variações climáticas. 3. ARDL. 4. SPEI. 5. Threshold. I. Título.
CDD 330

FRANCISCO HALYSSON VIEIRA

VARIAÇÃO CLIMÁTICA E ECONOMIA: IMPACTOS DE LONGO PRAZO E EFEITOS
SOBRE A ATIVIDADE ECONÔMICA MUNICIPAL NO BRASIL

Tese apresentada ao Programa de Pós-
Graduação em Economia da Universidade
Federal do Ceará como requisito parcial à
obtenção de título de Doutor em Economia.

Aprovado em: 21/07/2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Jair do Amaral Filho

Prof. Dr. Roberto Tatiwa Ferreira

Prof. Dr. Christiano Modesto Penna

Prof. Dr. Francisco José da Silva Tabosa

Prof. Dr. Guilherme de Oliveira Worm

Dedico esse trabalho à minha mãe, Cristiane, e minhas irmãs, Caroline e Letícia, pelo imenso apoio nessa jornada. Sem vocês isso não seria possível!

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ser meu guia e minha Fortaleza, tendo me confortado e me auxiliado durante toda minha vida.

Agradeço imensamente aos meus pais, Cristiane e Joaquim, por sempre terem me apoiado nos meus sonhos, assim como terem feito o impossível para oferecer uma educação de qualidade, além de me ensinarem como enfrentar os percalços da vida através dos valores mais dignos e da formação do meu caráter.

Às minhas irmãs, Caroline e Letícia, pela imensa ajuda e apoio incondicional.

À minha segunda família, Camila, Ticiane, Dona Auxiliadora e Dona Tereza pelo auxílio dado nessa fase tão importante da minha vida.

Ao professor e amigo Jair do Amaral Filho, que me acompanhou durante toda trajetória acadêmica, por todos ensinamentos que modificaram meu modo de pensar e também por todos os conselhos.

Ao professor e amigo Roberto Tatiwa Ferreira pelo apoio emocional, aprendizado adquirido, paciência, atenção e toda ajuda oferecida nessa fase tão importante.

Aos professores Christiano Penna, Guilherme de Oliveira e Francisco José por fazerem parte da minha banca examinadora e pelas valiosas sugestões.

A todos os funcionários do CAEN, pela simpatia e por sempre estarem à disposição para me ajudar no que fosse necessário. Em especial ao Cléber, um grande amigo que levarei para toda vida.

Agradeço a todos os amigos que fiz durante essa jornada, a todos professores do CAEN que contribuíram para minha formação acadêmica.

A CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), pelo apoio financeiro concedido para a bolsa de doutorado.

RESUMO

O tema das mudanças climáticas tem ganhado destaque crescente nas agendas e nos debates internacionais contemporâneos. A elevação de temperatura acima dos limites considerados humanamente confortáveis, aumento de chuvas torrenciais que provocam alagamentos em áreas urbanas, elevação do nível do mar que ameaça populações em ilhas e áreas litorâneas são só alguns dos fatores que conferem caráter de urgência à análise socioeconômica deste assunto. Diante disso, esta tese é composta por três capítulos que buscam elucidar alguns pontos sobre a variação do clima, desde as origens nas ciências das mudanças climáticas até seus impactos econômicos. O primeiro capítulo inicia-se com uma exposição sobre a evolução do conhecimento científico relacionado às mudanças climáticas. Além disso, nesta primeira parte, a partir de uma extensa revisão de literatura e análise econômica, apresentam-se os possíveis impactos dos choques climáticos nos fatores de produção, finalizando com discussões sobre as vulnerabilidades assimétricas entre os municípios, no que se refere às disparidades entre os mais ricos e mais pobres, e as prováveis causas para esse fenômeno. No segundo capítulo, a ideia central é a investigação dos possíveis efeitos da variabilidade climática sobre a economia dos municípios no longo prazo. Para isso foi aplicada uma metodologia de ARDL (*Autoregressive Distributed Lag*), adequada a esse horizonte de tempo, com dados de temperatura e precipitação extraídos de Saldanha, Akbarina *et al* (2024), e PIB *per capita* e Valor Adicionado Agropecuário para 5178 municípios brasileiros retirados do IBGE. Os resultados evidenciam uma heterogeneidade nos efeitos dos desvios pluviométricos em relação ao padrão histórico. Por outro lado, observam-se impactos negativos sobre o crescimento do PIB *per capita* e do Valor Adicionado Agropecuário em decorrência de desvios térmicos positivos. Esses achados sugerem implicações preocupantes para a economia brasileira, sobretudo diante da tendência de intensificação do aquecimento global. Mesmo no Nordeste e no Semiárido, por exemplo, com as características climáticas de calor e insolação, o aumento de apenas 0.01° C acima da média promove um decréscimo no PIB *per capita* de aproximadamente 0.06 pontos percentuais. Após analisar a questão temporal dos efeitos das mudanças climáticas, o terceiro capítulo desta tese procurou responder uma outra questão importante: os municípios mais secos poderão sofrer mais economicamente com as variações climáticas em comparação àqueles mais úmidos? Para tanto, foi utilizada uma metodologia *threshold*, com estimação endógena dos limiares, a partir de dados do PIB para os municípios brasileiros de 1999 a 2019 e do SPEI (*Standardised Precipitation-Evapotranspiration Index*), usada como variável independente. A partir disso, os resultados indicam que, independentemente da agregação espacial analisada, se nacional ou

regional, o conjunto de municípios mais secos apresenta piores condições econômicas em comparação àqueles municípios com maior Produto Interno Bruto. Por conseguinte, observa-se que, tendo em vista tais resultados, as questões climáticas não só apresentam impactos no longo prazo, mas também afetam de modo diferente os municípios brasileiros, de acordo com seu status econômico. Sendo assim, as análises realizadas neste trabalho permitem concluir que as mudanças climáticas representam desafios significativos para o Brasil, com potencial para impactar tanto a esfera econômica quanto a social.

Palavras-Chave: economia das mudanças climáticas; mudanças climáticas; economia do clima; variações climáticas; ARDL; SPEI; threshold.

ABSTRACT

The topic of climate change has gained increasing prominence in contemporary international agendas and debates. The rise in temperature beyond what is considered humanly comfortable, the increase in torrential rainfall causing flooding in urban areas, and the rise in sea levels threatening populations in islands and coastal regions are just a few of the factors that underscore the urgency of a socioeconomic analysis of this issue. In this context, this thesis is structured into three chapters that seek to shed light on different aspects of the topic, from the origins of climate science to its economic impacts. The first chapter begins with an overview of the evolution of scientific knowledge related to climate change. Furthermore, this initial section presents, based on an extensive literature review and economic analysis, the potential impacts of climate shocks on the factors of production, concluding with discussions on the asymmetric vulnerabilities among municipalities, particularly regarding disparities between wealthier and poorer regions, and the likely causes of this phenomenon. The second chapter focuses on investigating the potential long-term effects of climate change on the economies of Brazilian municipalities. For this purpose, an ARDL (Autoregressive Distributed Lag) methodology was applied, which is appropriate for long-term analysis. The model uses temperature and precipitation data extracted from Saldanha, Akbarina et al. (2024), along with per capita GDP and Agricultural Value Added for 5,178 Brazilian municipalities sourced from IBGE. The results reveal a heterogeneity in the effects of rainfall deviations from historical patterns. On the other hand, positive temperature deviations show negative impacts on the growth of per capita GDP and Agricultural Value Added. These findings suggest concerning implications for the Brazilian economy, especially in light of the ongoing trend of global warming. Even in regions such as the Northeast and the Semi-arid, which are characterized by heat and high solar radiation, an increase of just 0.01°C above the average leads to a decline in per capita GDP of approximately 0.06 percentage points. After analyzing the temporal dimension of climate change impacts, the third chapter addresses another important question: drier municipalities may suffer more economically from climate variations compared to wetter ones.? To investigate this, a threshold methodology was employed, with endogenous estimation of the thresholds, using GDP data for Brazilian municipalities from 1999 to 2019 and the Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index (SPEI) as the independent variable. The results indicate that, regardless of the spatial aggregation considered (national or regional), the group of driest municipalities exhibits worse economic conditions compared to municipalities with higher Gross Domestic Product. Therefore, it is observed that, given these results, climate-

related issues not only have long-term impacts but also affect Brazilian municipalities differently, depending on their economic status. Thus, the analyses conducted in this study lead to the conclusion that climate change represents significant challenges for Brazil, with the potential to affect both the economic and social spheres.

Keywords: climate change economics; climate change; climate economy; climatic variations; ARDL; SPEI; threshold.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema de balanço energético da Terra	17
Figura 2 – Temperatura Média dos municípios brasileiros (1999-2019) (°C)	55
Figura 3 – Precipitação Total nos municípios brasileiros (1999-2019) (mm)	56
Figura 4 – Temperatura média dos municípios na Amazônia Legal (1999-2019)	61
Figura 5 – Precipitação Média dos Municípios da Amazônia Legal (1999-2019).....	62
Figura 6 – Temperatura Média dos Municípios no semiárido em comparação com o Nordeste (1999 a 2019) (°C).....	64
Figura 7 – Precipitação Média dos Municípios no semiárido em comparação com o Nordeste (1999 a 2019) (mm).....	65
Figura 8 – Distribuição espacial da severidade da seca no Brasil em diferentes anos (a partir do SPEI).....	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores médios da amostra agrupado por estado (1999-2019) (continua).....	67
Tabela 2 – Efeitos de Longo Prazo da Mudança Climática na Taxa de Crescimento dos Principais indicadores econômicos para o Brasil (1999-2019)	72
Tabela 3 – Efeitos de Longo Prazo da Mudança Climática na Taxa de Crescimento dos Principais indicadores econômicos para a Amazônia Legal e Semiárido (1999-2019)	77
Tabela 4 – Relação da amplitude térmica e média da temperatura (1999-2019)	78
Tabela 5 – Estimativas do aumento médio anual da temperatura nas regiões (1999-2019).....	80
Tabela 6 – Estimativas do aumento médio anual da temperatura nos estados (1999-2019) (continua).....	80
Tabela 6 – Estimativas do aumento médio anual da temperatura nos estados (1999-2019) (conclusão)	81
Tabela 7 – Valores médios da amostra para o Brasil e Macrorregiões (1999-2019)	95
Tabela 8 – Valores dos Thresholds e Coeficientes para o Brasil	98
Tabela 9 – Valores dos Thresholds e Coeficientes para a Região Norte	99
Tabela 10 – Valores dos Thresholds e Coeficientes para a Região Nordeste	99
Tabela 11 – Valores dos Thresholds e Coeficientes para a Região Centro-Oeste	100
Tabela 12 – Valores dos Thresholds e Coeficientes para a Região Sudeste	101
Tabela 13 – Valores dos Thresholds e Coeficientes para a Região Sul	101
Tabela 14 – Efeitos de Longo Prazo da Mudança Climática na Taxa de Crescimento dos Principais indicadores econômicos para o Brasil (1999-2019) (continua).....	122

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação do Índice de Calor e seus efeitos nos seres humanos	36
Quadro 2 – Classificação de severidade da seca de acordo com o SPEI.....	91

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Choques Climáticos Transitórios	44
Gráfico 2 – Choque Climáticos Permanentes.....	45

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	13
2. MUDANÇAS CLIMÁTICAS E ECONOMIA: INTRODUÇÃO, RISCOS E DESIGUALDADES	16
2.1. INTRODUÇÃO.....	16
2.2. CLIMA E EVENTOS EXTREMOS	20
2.3. CLIMA E ECONOMIA	23
2.3.1. Produtividade Total dos Fatores - PTF (A).....	26
2.3.2. Capital Natural ou Terra (N).....	27
2.3.3. Capital Físico (K)	30
2.3.4. Trabalho (L) e Capital Humano (H)	32
2.4. CLIMA E DESIGUALDADE	37
2.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	45
3. ANÁLISE DO IMPACTO CLIMÁTICO DE LONGO PRAZO NA ECONOMIA: O CASO BRASILEIRO DE 1999 A 2019	47
3.1. INTRODUÇÃO.....	47
3.2. CLIMA E CRESCIMENTO	51
3.3. CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS	54
3.3.1. Região Norte.....	56
3.3.2. Região Nordeste	57
3.3.3. Região Centro-Oeste	58
3.3.4. Região Sudeste	58
3.3.5. Região Sul	59
3.3.6. OUTRAS ÁREAS	60
3.3.6.1. Amazônia Legal.....	60
3.3.6.2. Semiárido.....	62
3.4. DADOS E METODOLOGIA	66
3.4.1. Amostra	66
3.4.2. Metodologia.....	69
3.5. RESULTADOS	70
3.5.1. Resultados para Municípios Agrupados por Região	70
3.5.2. Amazônia Legal e Semiárido	76
3.6. TEMPERATURA	77
3.7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	81

4. ANÁLISE DA VARIAÇÃO CLIMÁTICA INTERMUNICIPAL E SEUS EFEITOS NA ATIVIDADE ECONÔMICA DO MUNICÍPIOS BRASILEIROS DE 1999 A 2019	83
4.1. INTRODUÇÃO.....	83
4.2. DADOS E METODOLOGIA	88
4.2.1. SPEI.....	88
4.2.2. Metodologia.....	91
4.2.2.1. Modelo.....	94
4.2.3. Amostra	95
4.3. RESULTADOS	97
4.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	102
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	104
6. REFERÊNCIAS	106
7. APÊNDICE	122

1. INTRODUÇÃO GERAL

Desde o século XIX, cientistas já se dedicavam ao estudo do que mais tarde seria reconhecido como o fenômeno das mudanças climáticas. Com os trabalhos pioneiros de Fourier, Arrhenius e outros, iniciou-se a construção do conhecimento científico sobre esse processo, demonstrando que não se trata de um tema recente para a humanidade. Apesar disso, é no contexto contemporâneo que os efeitos das mudanças climáticas se tornam cada vez mais evidentes. Eventos extremos vêm se intensificando em frequência e severidade, tornando os danos provocados pelo clima mais visíveis e palpáveis, como pode ser observado inclusive no Brasil, com as enchentes da Região Sul e secas na Região Norte. Diante da crescente clareza quanto à profundidade do problema e da iminência de suas consequências mais graves, torna-se imprescindível compreender os múltiplos desdobramentos das mudanças climáticas para a sociedade como um todo, incluindo, de forma particular, seus impactos econômicos e sociais.

À luz disso, esta tese tem como objetivo compreender de que forma a variabilidade climática impacta na realidade econômica do Brasil, por meio da análise dos danos de longo prazo à economia nacional e da investigação da relação entre as variações climáticas e a atividade econômica em nível municipal. Em outras palavras, existe uma relação não linear entre as condições climáticas locais e o PIB dos municípios brasileiros? Há, por exemplo, uma tendência de que municípios em áreas mais secas apresentem uma relação negativa com o PIB em comparação com aqueles localizados em regiões mais úmidas?

Nesse sentido, o primeiro capítulo busca compreender os danos causados pelas mudanças climáticas sobre os insumos produtivos e, consequentemente, sobre a produção agregada. Em outras palavras, investiga-se quais são os canais de transmissão por meio dos quais os choques climáticos afetam a capacidade produtiva de uma economia. Além disso, essa análise permite examinar a existência de diferenças na intensidade dos danos sofridos e absorvidos entre regiões mais ricas e mais pobres. Para atingir esse objetivo, parte-se de uma função de produção hipotética e do levantamento do referencial bibliográfico relevante, com foco nos efeitos sobre cada fator produtivo e em como essas relações podem contribuir para explicar as assimetrias entre localidades com distintos níveis de renda.

Já o propósito do segundo capítulo é investigar se a variabilidade climática — isto é, desvios nos níveis de precipitação e temperatura em relação às suas médias históricas — podem impactar a economia brasileira no longo prazo. Para isso, são utilizados dados climáticos de precipitação e temperatura no período de 1950 a 2019 (SALDANHA, AKBARINIA, *et al.*,

2024), bem como dados econômicos e demográficos do IBGE referentes ao período de 1999 a 2019, incluindo o PIB, a população residente e o valor adicionado agropecuário. A análise é conduzida por meio de um modelo ARDL (*Autoregressive Distributed Lag*), relacionando o PIB real per capita e o valor adicionado agropecuário real (a preços constantes de 2010) com os desvios climáticos, a fim de verificar se os efeitos das variações no clima se prolongam ao longo do tempo. Este capítulo contribui com a escassa bibliografia brasileira sobre os impactos climáticos de longo prazo na economia, além de sobrepor aos problemas de agregação espacial observados no referencial pertinente.

A principal suposição é de que haja efeitos climáticos no longo prazo, contudo, devido à complexidade climática observada no Brasil, também se espera que exista uma heterogeneidade dos resultados.

O terceiro capítulo dedica-se a compreender se há uma relação não linear entre o PIB municipal e as variações climáticas, isto é, se municípios mais secos tendem a apresentar um PIB inferior. Para isso, utiliza-se um modelo *threshold* com efeitos fixos e estimação endógena dos limiares de regime, combinando dados do PIB municipal (IBGE) e do SPEI (OLIVEIRA, 2023) para quantificar a severidade das secas, ambos referentes ao período de 1999 a 2019. Diferentemente da bibliografia disponível até o fechamento deste trabalho, este capítulo inova ao aplicar o SPEI em nível municipal em um modelo *threshold* com efeitos fixos, com o objetivo de estimar os valores a partir dos quais a variabilidade climática (neste caso a severidade da seca) passa a exercer um efeito estatisticamente significativo sobre a atividade econômica. A hipótese é que, quanto mais seco for o regime climático no qual o município se encontra, mais negativa será a relação entre a condição de seca e o desempenho econômico local.

Em resumo, esta tese investigou o impacto das mudanças climáticas sobre o crescimento econômico em nível municipal no Brasil, com foco especial na dimensão temporal, analisando se os efeitos perduram no longo prazo, e na dimensão espacial, ou seja, se municípios em áreas mais secas enfrentam maiores prejuízos econômicos. Os resultados indicam grande heterogeneidade nos efeitos dos desvios da precipitação em relação ao seu normal histórico no longo prazo, com áreas apresentando efeitos negativos, positivos, mistos ou insignificantes. Contudo, verificou-se que temperaturas elevadas, acima do normal histórico, impactam negativamente o crescimento do PIB per capita e do valor adicionado agropecuário em quase todas as regiões, excetuando-se apenas a região Sul do país. Além disso, constatou-se que

municípios situados em regiões com condições climáticas mais secas apresentam, em média, um PIB municipal significativamente menor, confirmando a existência de uma relação não linear entre variáveis climáticas e desempenho econômico local. Dessa forma, esta pesquisa contribui para aprofundar a compreensão dos canais pelos quais o clima influencia o desenvolvimento socioeconômico no Brasil, das variáveis climáticas que podem prejudicar a economia no longo prazo e de como as realidades climáticas locais podem afetar o crescimento econômico, oferecendo assim subsídios importantes para estratégias de adaptação e planejamento regional.

2. MUDANÇAS CLIMÁTICAS E ECONOMIA: INTRODUÇÃO, RISCOS E DESIGUALDADES

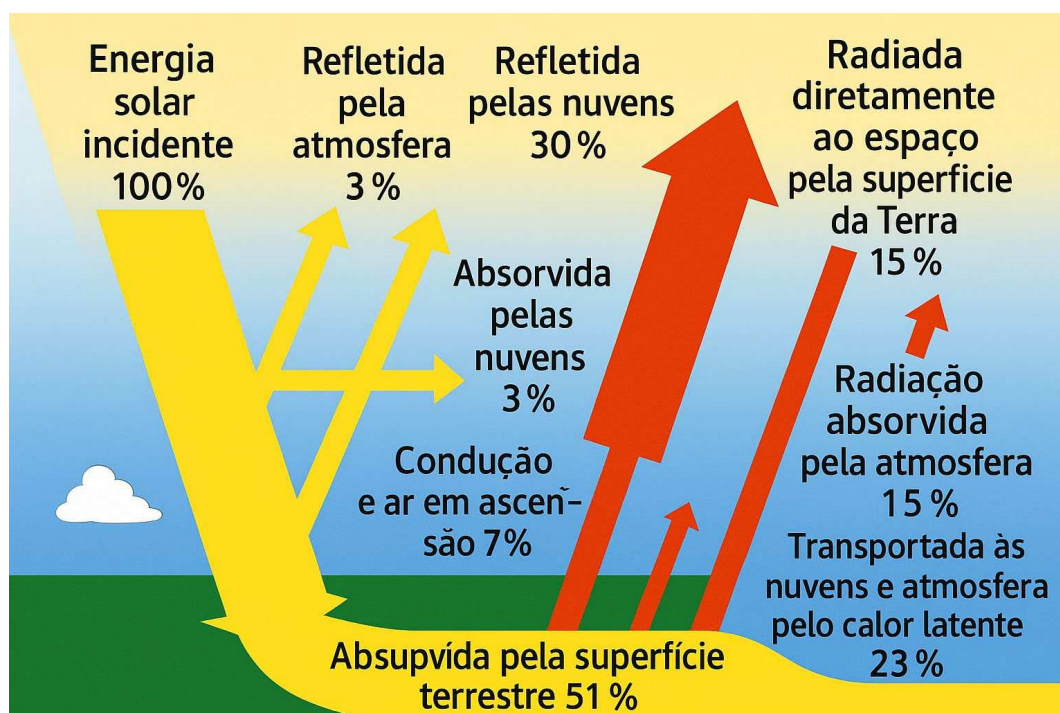
2.1. INTRODUÇÃO

Em 2025 o Brasil tornar-se-á palco de um debate que se tornou mundialmente crescente e prioritário dentre os debates, ao ser anfitrião da Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas (ou 30ª Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima – COP30). O debate em torno desse fenômeno, das mudanças climáticas, a despeito de ter ganho destaque na atualidade ele teve um longo caminho de construção, iniciando em 1979 com a Primeira Conferência Mundial sobre o Clima, organizada pela WMO (*World Meteorological Organization*), e com a COP1, ocorrida em 1995.

De acordo com a Organização das Nações Unidas (ONU) (2025a), as mudanças climáticas são transformações a longo prazo nos padrões de temperatura e clima. Por mais que pareça excessivamente suscinta, tal definição traz questionamentos profundos, principalmente por meio da palavra *transformações*, que leva a três indagações essenciais para este trabalho: o que são, quem as gera e o que pode causar.

Para responder o primeiro destes questionamentos, deve-se ter em mente a ciência construída por trás das mudanças climáticas. A princípio, assim como observado por Fourier (1824), há certos gases atmosféricos que envolvem o planeta como uma espécie de “proteção transparente”, ou por exemplo, uma “redoma de vidro”. Este “envelope” atmosférico, que ajuda a limitar a perda de calor, possui a propriedade de permitir a passagem dos raios solares, carregados de calor, para sua absorção pela Terra. Contudo, de toda energia emitida pelo Sol para o planeta, aproximadamente um terço é refletida novamente para o espaço. Os dois terços restantes são absorvidos por diferentes componentes, dentre eles: atmosfera, superfície terrestre e oceanos. Sendo assim, a Terra é aquecida por este calor retido no planeta, tornando-o uma espécie de estufa, que é balanceada no longo prazo por essas absorções e reflexões de energia. Este processo pode ser observado na Figura 1, abaixo.

Figura 1 – Sistema de balanço energético da Terra



Fonte: University Corporation For Atmospheric Research (UCAR) (2025), traduzido pelo autor.

Há, porém, outro ponto chave que precisa ser esclarecido: a forma pela qual este calor é absorvido. Como já citado anteriormente, Fourier (1824) foi o primeiro a demonstrar que existem certos gases na atmosfera que têm a capacidade de absorver calor e reduzir a perda de temperatura da Terra. Este sistema funciona a partir de diferenças nos comprimentos de onda da energia solar que chega ao planeta, com o calor que é dissipado pelo planeta. Dito de uma forma mais simples, imagine a Terra envolta em uma redoma de vidro transparente, como foi dito, na qual permite a luz passar sem maiores problemas, assim como o vidro de uma janela. Isto ocorre, pois, os raios solares possuem um pequeno comprimento de onda¹, pertencente ao espectro visível. Entretanto, a partir do momento que chega à superfície, parte do calor destes raios é absorvido e refletido novamente para a atmosfera, agora em um comprimento de onda maior e sob o espectro de infravermelho, similar ao calor radiando de um forno ou de areia quente, mas que não é observado pelos olhos humanos². A partir dessa segunda etapa, o outrora calor que passava tranquilamente pela “redoma de vidro” não consegue mais voltar para o

¹ De $0,25\mu$ a $1,5\mu$ por exemplo (CALLENDAR, 1938, p. 230)

² Também chamados de raios de calor escuros (ARREHNIUS, 1908). Um outro exemplo dessa situação pode ser visto em aparelhos de visão térmica.

espaço, pois com uma radiação em infravermelho os gases que compõem a atmosfera funcionam como uma barreira e absorvem esse calor.

Mesmo com tais descobertas, ainda não se apresentavam questionamentos climáticos similares aos moldes atuais. Como visto acima, os estudos até então realizados conseguiam explicar a estrutura climática, mas não investigavam de maneira profunda a relação entre as mudanças na concentração atmosférica de alguns gases com o clima terrestre, o que mudou com o pioneirismo de Svante Arrhenius, também conhecido como “o pai da ciência das mudanças climáticas”. Em Arrhenius (1896)³, houve o pioneirismo em estudar o efeito da duplicação do dióxido de carbono (CO_2) atmosférico na temperatura global. Por mais que sua intenção original fosse analisar as consequências geológicas da Era Glacial, suas conclusões foram essenciais para o estudo das mudanças climáticas. Como exemplo, seus estudos descreveram um *energy budget model*⁴ que considera tanto os efeitos radioativos do ácido carbônico⁵ e vapor de água na temperatura da Terra, quanto variações na concentração atmosférica do dióxido de carbono. Além disso, suas conclusões mostraram que se o ácido carbônico (e por conseguinte o dióxido de carbono) cresce em uma progressão geométrica, o aumento da temperatura global irá crescer em uma progressão aritmética (ARRHENIUS, 1896, p. 267)⁶.

A partir deste trabalho inicial, Svante Arrhenius conseguiu se aprofundar ainda mais nas questões climáticas e em Arrhenius (1908) mostrou-se que o impacto antropogênico na atmosfera, causado pelos avanços industriais, pode alterar em um grau perceptível (ARREHNIUS, 1908, p. 63). Em outras palavras, a enorme combustão de carvão gerada pela indústria naquela época seria suficiente para aumentar a porcentagem de dióxido de carbono no ar em nível visível.

Ainda assim, faltavam análises e estudos concretos sobre a interferência humana no clima terrestre. Por isso, em um segundo momento, destaca-se Callendar (1938) como um dos primeiros trabalhos que mostrava de forma robusta a correlação positiva entre o aumento do dióxido de carbono atmosférico, devido à queima de combustíveis fósseis, e o aumento da

³ Ver Tyndall (1861), trabalho que se inspirou em Fourier e que por consequência inspirou Arrhenius.

⁴ O *energy budget model* é um modelo que fornece uma maneira de contabilizar toda a energia que entra e sai do sistema terrestre (UNIVERSITY CORPORATION FOR ATMOSPHERIC RESEARCH - UCAR, 2025).

⁵ O ácido carbônico nada mais é que o dióxido de carbono quando reage com a água.

⁶ Como um dos resultados adicionais, Arrhenius (1896, p. 268) conclui que para o mundo voltar a Era Terciária, na qual o ártico ainda possuía vegetação, a temperatura atual deveria subir 8° a 9° C e o ácido carbônico deveria subir de 2,5 a 3 vezes do valor na época.

temperatura no planeta. Como observado em sua pesquisa, a elevação da temperatura média, devido ao aumento artificial de dióxido de carbono, é estimado em 0,003° C por ano em 1937 e tem apresentado uma taxa média de 0,005° C por ano durante parte do século 19 (CALLENDAR, 1938, p. 223).

Já por volta dos anos 50, melhorias e progressos ainda eram desenvolvidos sobre os trabalhos quando Gilbert N. Plass promoveu uma consolidação importante, na qual as atividades humanas ao aumentar o dióxido de carbono estavam mudando o clima global. Em Plass (1956)⁷, através de cálculos mais precisos que seus antecessores (como Arrhenius e Callendar) o autor concluiu que a temperatura média da superfície terrestre aumenta 3,6° C se a concentração de CO_2 na atmosfera dobrar e cai 3,8° C se este gás for diminuído pela metade (PLASS, 1956, p. 142). Ademais, neste mesmo estudo afirma que a quantidade extra de dióxido de carbono aportado para a atmosfera pelo processo antropogênico (industrial ou outras atividades) pode ter causado o aumento da temperatura no século 20, contrastando com outras teorias ao predizer que este aquecimento iria continuar por séculos a fio.

Após isso, mais alguns trabalhos foram realizados neste campo. Dentre eles se destaca, Shanklin, Farman e Gardiner (1985) com uma revelação marcante para as discussões sobre a mudança climática. Ao analisarem os valores de ozônio na primavera antártica perceberam que, ao contrário do previsto pelos modelos da época, os valores de ozônio total neste continente caíram consideravelmente. Como a circulação na estratosfera parecia inalterada, a causa mais provável passou a ser alterações químicas oriundas do crescimento do cloro ativo inorgânico em temperaturas muito baixas. Dessa forma estava descoberto o “buraco” na camada de ozônio, consequência principalmente das emissões de CFC (Clorofluorcarboneto) pela humanidade através de aerossóis, gases de refrigeração (geladeira e ar-condicionado) e solventes industriais.

Tendo em vista os fatos acima, é possível ter um vislumbre que parte das transformações questionadas inicialmente são principalmente mudanças no fluxo de energia e calor no âmbito atmosfera-superfície terrestre. Estas alterações geram principalmente mudança na estrutura climática terrestre e, por consequência, o aumento da temperatura. Contudo, ao observar atentamente, é possível concluir também um denominador comum entre todas as teorias para o causador destas transformações: o ser humano. Logo o cerne das causas das mudanças

⁷ Destaca-se que diferentemente de Arrhenius (1896) e Callendar (1938), Plass (1956) já explicitava o termo *climate change* em seu título.

climáticas estaria na geração de danos no clima por meio do homem, respondendo dessa maneira a segunda questão sobre as causas das mudanças, das transformações.

Sendo assim, fica uma última questão em aberto: o que as transformações causam? Por mais que já tenha antecipado na definição como mudanças “*a longo prazo nos padrões de temperatura e clima*”, muitos problemas contidos no termo “*clima*” ainda podem ser revelados. Isto é, mesmo parecendo uma passagem simples, na verdade se apresenta como extremamente complexa, que pode conter as mais variadas respostas dependendo da visão e campo de pesquisa a ser abordado. Tendo em vista a natureza interdisciplinar do problema, o foco deste trabalho será tratar esta questão considerando, essencialmente, uma visão econômica e social.

A partir dessa visão, será possível ver que os choques climáticos podem afetar o processo de crescimento econômico das mais diversas formas e por intermédio de todos os fatores produtivos disponíveis: desde a degradação da terra arável, aos problemas energéticos que afetam o capital físico e os danos causados por doenças físicas e mentais aos diferentes tipos de trabalhadores, mas com crueldade maior para aqueles sem capital humano. Nesse caso, a falta de adaptabilidade aos choques resultam em problemas vistos na esfera social como má-nutrição, exaustão pelo calor e migração, como única forma de salvação em casos extremos.

Por fim, para o aprofundamento nestas problemáticas, além desta primeira seção, o presente capítulo expõe na seção 2.2 uma forma concreta de visualizar as mudanças climáticas com o auxílio dos eventos extremos. Na seção seguinte, 2.3., será explorada a abordagem econômica propriamente dita, com a apresentação dos choques produtivos que impactam a economia e suas fontes. Posteriormente, na seção 2.4, analisar-se-á a sensibilidade desigual entre localidades geográficas e níveis de renda, os impactos oriundos dos choques climáticos e questões de adaptabilidade e mitigação, encerrando com algumas considerações finais na seção 2.5.

2.2. CLIMA E EVENTOS EXTREMOS

A princípio, é necessário observar que a estrutura atmosférica responsável pela absorção de calor não é por si só maléfica para o planeta. Este sistema, explicado de forma detalhada na introdução deste trabalho, tem como função natural manter a temperatura terrestre em níveis habitáveis, caso contrário, a Terra poderia se tornar inóspita, seja devido ao fluxo excessivo de raios ultravioletas ou por ser demasiadamente frio. Logo, o primeiro ponto de destaque é que o aumento da temperatura ou o chamado Efeito Estufa, só se torna prejudicial, e pode ser

considerado um problema para a humanidade, quando passa de um nível natural aceitável. Sendo assim, quando este estudo analisar o problema do Efeito Estufa, será utilizada a concepção do Aquecimento Global, ou seja, explicitamente abordando o problema de temperatura em níveis não naturais e ocasionados a partir da ação humana.

Além disso, na seção anterior se demonstrou como a problematização das mudanças climáticas foi contruída ao longo do tempo até se tornar o tema conhecido atualmente. Entretanto, devido à complexidade do tema, alguns pontos implícitos na definição apresentada pela Organização das Nações Unidas (ONU) (2025a) podem passar despercebidos, mas que são essenciais para aumentar a compreensão sobre o impacto do clima mundial na vida cotidiana. Por consequência, as citadas “*mudanças no clima*” podem ser vislumbradas a partir de um conjunto de problemas, entre eles o aumento na ocorrência de eventos extremos.

A preocupação, e concentração, nestes eventos se deve ao poder destrutivo global que possuem e à capacidade de surgir nas mais diversas fontes. Atualmente, o aumento de temperatura gerado pelo Aquecimento Global, torna-se o primeiro e mais óbvio dano extremo causado por tais mudanças. Seus efeitos diretos na condição humana, sob a forma de calor⁸, não podem ser menosprezados, no entanto, o prejuízo advindo da elevação térmica se expande para a geração de chuvas torrenciais, seca, aumento do nível do mar, etc.

No primeiro caso, como constatado por IPCC (2021) e Bao (2017), as ocorrências de precipitações extremas vão aumentar devido às mudanças climáticas. O processo de precipitação funciona de forma bem simples: em meio ao ciclo hidrológico, a água da superfície terrestre (em rios, lagos, oceanos, evapotranspiração de plantas e solo, etc) é aquecida pelo Sol, se transforma em vapor de água e sobe para atmosfera, que após a condensação de pequenas gotículas de água se transformam em nuvens. Após isto essas gotículas se unem em gotas cada vez maiores, até o ponto no qual se tornam tão grandes que acabam caindo em forma de chuva. Por mais que essa explicação seja demasiadamente simplista, já é o suficiente para se entender como as mudanças climáticas podem impactar na geração de extremos climáticos⁹.

Sendo assim, quanto maior a temperatura, maior será o nível de água em forma de vapor gerada na superfície terrestre para a atmosfera. Somado a isso, através da equação de Clausius-Clapeyron (WALLACE e HOBBS, 2006, p. 97-99; COOK, 2019, p. 8) se observa que quanto

⁸ Ver National Weather Service (2025) se quiser observar o *Heat Index* e suas consequências para saúde física das pessoas. Contudo, será apresentado na seção 2.3.4.

⁹ Para mais detalhes ver Ahrens e Samson (2010)

maior o aumento da temperatura, maior quantidade de vapor d'água retido na atmosfera¹⁰. Isto significa que em ambientes com grande oferta de vapor, como por exemplo áreas próximas de oceanos, que se beneficiam pela convecção do vapor de água, aumentam-se as chances de mais chuvas e com maior intensidade. Logo, com a elevação da temperatura observada com o Aquecimento Global, a precipitação tende a aumentar como resposta ao crescimento da evapotranspiração (COOK, 2019, p. 102; DESSLER, 2021)¹¹.

Ademais, com maiores chuvas torrenciais o solo satura antes do fim de chuva, provaconado assim o surgimento das inundações rápidas (flash-floods), principalmente em áreas urbanas asfaltadas e com baixo índice de permeabilidade. Ainda na área urbana, estes eventos pluviométricos extremos ainda podem prejudicar não só a infraestrutura rodoviária, como também os estabelecimentos que sofrem com enchentes e áreas residenciais localizadas em áreas com o risco de deslizamento.

Contudo, se em áreas onde a oferta de umidade para atmosfera pode aumentar a capacidade de precipitação, outras localidades podem sofrer com a situação contrária. A partir das análises científicas se observou a situação na qual *“o [clima] seco vai se tornar mais seco, e o úmido mais úmido”* (COOK, 2019, p. 102; DESSLER, 2021, p. 151). Em outras palavras, as mudanças climáticas não vão apenas impactar no excesso de chuvas, mas também no agravamento das secas em áreas que já sofrem com esse mal. Isto significa que, em áreas com restrição de umidade, como o semiárido brasileiro, a elevação da temperatura fará a água do solo e das plantas evaporarem mais rapidamente, resultando em secas, ou agravamento deste fenômeno.

Mesmo assim, o sistema climático global é extremamente complexo e vai além de destas características pontuadas anteriormente. Como observado em Cook (2019, p. 26), no decorrer do ano, a atmosfera possui uma oferta líquida de energia solar maior que a saída de ondas longas na Linha do Equador e nos trópicos (recebe mais energia do que reflete), em vez disso nas latitudes mais elevadas há um déficit líquido de energia. Essas diferenças criam gradientes de energia que geram circulações na atmosfera, possuidoras de capacidade para criar algumas características climáticas, devido a maiores impactos na sazonalidade e distribuição de precipitação pelo mundo. No caso do aquecimento da superfície próxima à Linha do Equador,

¹⁰ Com 1° C a de aquecimento, a pressão do vapor de saturação, que é a pressão máxima que pode ser exercida sobre o vapor de água antes que este condense, aumenta aproximadamente 7% (COOK, 2019, p. 8)

¹¹ Além da necessidade de frio para a supersaturação, o outro maior requerimento para precipitação é a fonte de umidade (ex: evapotranspiração) (COOK, 2019).

por exemplo, forma-se uma região de baixa pressão e movimento ascendente na atmosfera, chamado de ZCIT (Zona de Convergencia Intertropical)¹².

A ZCIT, assim como apresentado por INMET (2023), é um dos principais sistemas meteorológicos causadores de chuva, principalmente nas regiões Norte e Nordeste do Brasil. Tendo isso em vista, com o Aquecimento Global nos níveis atuais, esse sistema pode apresentar um deslocamento sazonal alterado mais próximo ao hemisfério Norte em períodos não costumeiros, resultando assim, em períodos de secas mais extensas e intensas nas regiões Norte e Nordeste. O inverso também é verdadeiro, ou seja, existe a possibilidade de potencialização desse sistema e, portanto, ocorreriam chuvas mais intensas nestas regiões e seca no hemisfério Norte.

O aumento do nível do mar é outro episódio resultante das mudanças climáticas que levanta preocupação na população mundial, principalmente de cidadãos residentes em ilhas e cidades costeiras. Este evento, indiscutivelmente, é visto como um impacto certo das mudanças climáticas (DESSLER, 2021, p. 153), ainda mais com análises que mostram o nível médio global do mar com crescimento rápido desde 1960, com um aumento médio de 3,7 mm por ano no período de 2006 a 2018 (IPCC, 2021, p. 1216). Neste caso, com a influência da temperatura, duas razões explicam tal fenômeno (DESSLER, 2021, p. 153): o derretimento de geleiras¹³ (no qual a água segue para o oceano e aumenta seu nível) e devido ao fenômeno térmico de expansão da água quando aquece. Dentre esses casos, a maior contribuinte para o aumento médio no período de 2006 a 2018 foi o derretimento glacial com 41%, com a expansão térmica da água apresentando 38% (IPCC, 2021, p. 1216). O que torna tudo ainda mais alarmante é a certeza da continuidade desse processo no próximo século (IPCC, 2021, p. 1216; DESSLER, 2021, p. 153) e a predição que o nível dos mares aumentará de 47 a 73 cm acima dos níveis de 1995-2014 até 2100 (DESSLER, 2021, p. 153). Pode até parecer pouco, mas isso significa danos socioeconomicos catastróficos em residentes de ilhas e áreas litorâneas.

2.3. CLIMA E ECONOMIA

Dada a evidência causal entre as mudanças climáticas e a potencialização de eventos extremos, não é surpresa alguma que o campo da economia e seus pesquisadores também

¹² Como este trabalho não visa tratamento técnico extensivo sobre o clima, aconselha-se a consulta em Wallace e Hobbs (2006, p. 14-16), Cook (2019, p. 26) e INMET (2023)

¹³ Destaca-se que geleiras, neste contexto, refere-se apenas aquelas fixas de alguma forma a terra firme. No caso de pedaços de gelo à deriva no oceano não entram nessa contabilidade, pois seguindo o Princípio de Arquimedes tais pedaços de gelo já estariam deslocando um volume de água equivalente ao seu peso (DESSLER, 2021, p. 25).

usufruísem deste assunto para promover suas análises e estudos sobre os impactos socioeconômicos. Além disso, o núcleo de diferentes problemas relacionados ao clima está diretamente ligado a assuntos econômicos. Veja, por exemplo, a problemática antropogênica apresentada na introdução, na qual as mudanças no clima são resultado de emissões poluentes humanas. Neste caso, ambientalistas e cientistas climáticos possuem uma forma específica de perceber essa questão, com suas próprias ferramentas e respostas em mente. Contudo, para o economista, o vislumbre da atmosfera terrestre passa a ser de um bem comum por definição, no qual não possui nenhum direito de propriedade ligado a si. Em vista disso, os economistas podem observar tal problemática a partir da situação observada na Tragédia dos Comuns para a mitigação dos danos, no qual a cooperação ou a internalização dos custos sociais resultam na solução ótima.

Sendo assim, partir das pesquisas econômicas nesta área destacam-se alguns estudos que podem, de alguma forma, sinalizar uma quebra de paradigma sobre o fenômeno em questão. Dentre eles, a primeira vez que a questão climática foi abordada, mesmo que de forma periférica, ocorreu com o denominado Clube de Roma, por meio de Meadows, Meadows *et al* (1973). Mesmo que a concentração principal do estudo estava fundamentada na questão ambiental, os pontos iniciais de uma preocupação com o clima foram observados na obra como nos impactos do calor e no clima local de Los Angeles (MEADOWS, MEADOWS, *et al.*, 1973, p. 68) ou com análise de custos da poluição (MEADOWS, MEADOWS, *et al.*, 1973, p. 132)

Mesmo com a contribuição inicial deste trabalho, talvez o precursor e mais influente economista sobre o assunto climático seja Willian D. Nordhaus, não por coincidência foi laureado “*por integrar a mudança climática na análise macroeconômica de longo prazo*” no Prêmio Nobel de Economia em 2018 (THE NOBEL PRIZE, 2018). Em seu primeiro artigo sobre o assunto, lançado em 1975, Nordhaus (2019)¹⁴ apresenta o marco inicial da integração entre economia e clima. Nas suas análises sobre a poluição, percebeu que os problemas de emissão são majoritariamente advindos do setor energético, 98% das emissões antropogênicas para ser mais exato, sendo assim seu objetivo central é responder como nós podemos limitar a concentração atmosférica de CO_2 a um nível razoável, quanto custará e se é um programa factível, tendo em vista os efeitos nos preços de energia. Logo, sua ideia era construir um

¹⁴ Este artigo, anteriormente não publicado, foi divulgado como um *working paper* emitido pelo Instituto Internacional de Análise de Sistemas Aplicados (International Institute of Applied Systems Analysis – IIASA), em Luxemburgo, Áustria, em junho de 1975.

modelo para o problema de emissões, utilizando como estratégia as próprias forças de mercado, isto é, nos preços (*carbon tax*) para o controle.

Em Nordhaus (1991) e Nordhaus (1992b)¹⁵, o autor ainda mostra preocupação com a limitação do dióxido de carbono na atmosfera, ao explorar com mais profundidade a aplicação das taxas de carbono (*carbon tax*) e mostrar que um nível modesto destas taxas pode ser eficiente para desacelerar o Aquecimento Global, enquanto políticas mais rígidas ou de estabilização climática impõem significativos custos econômicos¹⁶. Além disso, no primeiro trabalho já inicia o rascunho de um modelo de crescimento econômico com ligações entre a economia, emissões e mudanças climáticas. Contudo, com o segundo artigo, Nordhaus muda o panorama da economia das mudanças climáticas ao apresentar o DICE (*Dynamic Integrated model of Climate and the Economy*), um modelo de equilíbrio geral intertemporal que incorpora dinâmicas de emissões, impactos econômicos e custos econômicos de políticas para a redução de emissões¹⁷, constituindo-se como uma referência fundamental para análises futuras sobre mudanças climáticas e economia. Isso se reflete no número de modelos que seguiram a sua lógica: PAGE (HOPE, ANDERSON e WENMAN, 1993)¹⁸ e FUND (RICHARD, 1995)

Desde essas pesquisas, um ramo completo da economia foi construído e consolidado no decorrer do tempo. Grande parte deste campo se concentra em seguir aspectos macroeconômicos, como são estudos de Nordhaus, Stern, Richard Tol, Latouche, etc, no entanto, por mais que essas análises sejam de suma importância para uma perspectiva de resolução do problema no longo prazo, suas contribuições agregadas podem esconder muitos detalhes extremamente importantes. Primeiro que, ao se concentrar em políticas globais de controles de emissão do dióxido de carbono, fez com que preocupações com danos em nível geográfico menor (em nível de país, estado ou municípios) fossem deixados de lado e, em segundo lugar, alguns questionamentos, tais como eventos extremos resultantes das mudanças climáticas que podem definir episódios de crescimento não são abordados.

¹⁵ Cita-se que a construção das primeiras versões do modelo serem dos anos 1990, além disso os primeiros workpapers para apresentação do modelo indicam ser de janeiro de 1992 (NORDHAUS, 2025), contudo a primeira versão publicada e que apresenta a aplicação do modelo e suas conclusões é Nordhaus (1992b). Sua consolidação ocorre em Nordhaus (1994).

¹⁶ Pensamentos iniciais dessa conclusão podem ser vistos em Nordhaus (2019), no qual encontra que a redução de emissões não precisava ser feita no curto prazo.

¹⁷ Para ver os pormenores do modelo DICE consultar Nordhaus (1992a), Nordhaus (1993), Nordhaus e Boyer (2000).

¹⁸ A versão de 2002 do modelo foi utilizada para formular o Relatório Stern (STERN, 2006).

Dessa forma, para tentar contornar esses gargalos esta seção apresentará algumas discussões sobre as questões econômicas que surgem com o clima. Para isso, tem-se a função de produção a seguir:

$$Y = F(A, N, K, L, H) \quad (1)$$

onde Y é o produto da economia, A é a produtividade total dos fatores, N é o capital natural ou terra, K é o capital físico, L é o estoque de trabalho (excluindo capital humano) e H é o estoque de capital humano na economia.

A partir dessa abordagem adaptada da contabilidade de crescimento será possível entender como, independentemente das divisões geográficas, os desastres naturais podem provocar impacto no produto local (RADDATZ, 2009) e quais são os *inputs* responsáveis por esta propagação.

Ademais, para o melhor entendimento dos impactos climáticos, cada um dos *inputs* da função de produção (1) serão analisados separadamente como a seguir.

2.3.1. Produtividade Total dos Fatores - PTF (A)

Como apresenta Amaral Filho, Penna e Vieira (2021) a produtividade total dos fatores, ou nível de progresso tecnológico, é um componente chave para explicar as diferenças de produtividade dos fatores por trabalhador entre as economias, por meio da incrementação na relação capital-trabalho. A sua constituição é fator chave para explicar as diferenças de renda no mundo. Ela pode ser constituída por diversos fatores e ainda apresenta dubiedade sobre esses elementos: ambiente operacional no qual a produção ocorre (FRIED, LOVELL e SCHMIDT, 2008), ambiente institucional (ACEMOGLU e ROBINSON, 2008; HALL e JONES, 1999), entre outros. Assim, os fatores que concorrem para o aumento da PTF podem ter variadas fontes e naturezas e, muitas vezes, se sustentam em fundamentos micro e meso econômicos¹⁹. Para facilitar a abstração nesta pesquisa a Produtividade Total de Fatores também pode ser entendida como o crescimento do produto que não é explicado pelo respectivo aumento na utilização dos fatores produtivos (capital físico e capital humano), ou seja, posicionando-se como um resíduo²⁰.

¹⁹ Para uma rápida análise sobre a Produtividade Total dos Fatores e discussão sobre contabilidade de crescimento veja Amaral Filho, Penna e Vieira (2021).

²⁰ Também denominado de “resíduo de Solow” na literatura de Contabilidade de Crescimento.

Ademais, é natural que dada a complexidade da sua constituição, diversos fatores que podem gerar efeitos negativos indiretos na PTF são diretamente atrelados às alterações no clima global, mesmo aqueles que parecem ser totalmente desconexos desta questão. Observe, por exemplo, a questão de gênero, em que mulheres residentes na área rural, expostas às condições de seca na infância terão mais problemas de saúde, receberão menos educação e podem gerar bebês menos saudáveis (HYLAND e RUSS., 2019), ou seja, apresentam mecanismos que subutilizam o capital humano não só no curto como no longo prazo e limitarão o acesso da mulher ao ambiente político-institucional de forma ótima.

A violência é outro destes pontos que as pessoas normalmente não associam aos problemas climáticas e que podem afetar a Produtividade Total dos Fatores. Por mais que pareça contraintuitivo, o estresse provocado pelas secas pode promover, por meio do aumento de roubos (GOIN, RUDOLPH e AHERN, 2017), por um cenário de instabilidade a partir de conflitos civis pela falta de recursos hídricos e ausência de políticas para sua minimização (GLEICK, 2014; KELLEY, MOHTADI, *et al.*, 2015; ADAAWEN, RADEMACHER-SCHULZ, *et al.*, 2019), choques na PTF. Estes choques podem ser transmitidos, por exemplo, a partir de efeitos negativos sobre o deslocamento e logística do escoamento da produção, na eficiência alocativa e no ambiente institucional. Ademais quaisquer condições que afetem a sua intensidade também afetarão a PTF.

Ambos os exemplos ilustram como o clima pode afetar a Produtividade Total dos Fatores a partir dos mais diversos canais, incluindo aqueles pouco mencionados, como é o caso da violência e das relações de gênero. Certamente, existem outros componentes que poderiam ser citados, juntamente com seus respectivos impactos causados pelo clima, no entanto, neste trabalho, tal fator da função de produção (1) assumirá um papel ainda mais relevante: um caminho para promover alternativas, contornar choques do Aquecimento Global e suas respectivas consequências. Isto significa que a PTF tem grande papel nas questões de adaptação e mitigação da sociedade, sendo assim, sua análise tem uma utilidade ainda maior ao ser aprofundada na próxima seção.

2.3.2. Capital Natural ou Terra (N)

Diferentemente da apresentação econômica mais comum, tratar o capital natural (ou o estoque de terras) separadamente do capital físico pode gerar *insights* essenciais sobre a questão climática, ainda mais quando se pensa no processo de crescimento e desenvolvimento em localidades com elevada participação do setor agrícola, número de agricultores familiares ou

até sobre aspectos na oferta de alimentos. Um dos exemplos mais evidentes são nos países em desenvolvimento, como é o caso do Brasil, os quais apresentam, em várias das suas regiões (?), maior probabilidade de competição por terras aráveis, dados a baixa produtividade, baixa tecnologia adicionada, aumento no crescimento populacional, uma inadequada infraestrutura e suscetibilidade de choques climáticos. Por consequência, em nível global, estes pontos afetam a segurança alimentar da população mundial (IPCC, 1992) uma vez que podem afetar negativamente a produtividade de colheitas e a produção de alimentos em várias regiões do planeta (PEÑA-LÉVANO, TAHERIPOUR e TYNER, 2019).

Em vista disso Stern (2006, p. 57) demonstra que o aumento de apenas 2° C na temperatura terrestre já causaria declínios acentuados na produtividade das colheitas, com redução de 5% a 10% no continente africano. Da mesma forma Newell, Prest e Sexton (2021) encontraram efeitos marginais significantes da temperatura tanto na produção agrícola, quanto no PIB dos países pobres. No caso do Nordeste, projeções de aumento da temperatura média em 4° C mostram que os riscos de seca aumentarão, resultando em baixa produtividade vegetal e aumento das colheitas imprevisíveis. Mais especificamente, em municípios onde há baixa diversidade de culturas e dominância da agricultura de subsistência, mesmo uma seca moderada pode causar um declínio nas colheitas, sendo assim, riscos maiores de seca (como projetado) gerarão um cenário devastador para a segurança alimentar, as economias regional e nacional (MARENGO, CUNHA, *et al.*, 2019, p. 194).

Como já foi visto, a mudança climática pode significar mudança nos regimes de temperatura e precipitação. Neste caso Veni, Srinivasarao *et al* (2020) mostram que o aumento do calor levará a mudanças físico-químicas provenientes da inibição da população micro biótica, alteração da estrutura do solo e de sua composição. Além disso, estas mesmas ondas de calor gerarão o aumento da emissão de dióxido de carbono para atmosfera. Isto, em geral, significa perda de carbono orgânico²¹, ou seja, diminuição da retenção e absorção da água, diminuição da fertilidade e diminuição da aeração para respiração no solo. Sendo assim, quaisquer práticas que levam ao declínio de carbono orgânico diminuirá a estabilidade agregada do solo, da taxa de infiltração e aumento da suscetibilidade de compactação.

²¹ Em geral está ligado a perda de matéria orgânica pelo solo. A matéria orgânica é o “alimento” da planta que leva ao seu crescimento contínuo e eficiente (VENI, SRINIVASARAO, *et al.*, 2020).

Destaca-se ainda que este processo de compactação do solo gera uma diminuição de oxigênio para as plantas e micro organismos respirarem, menos água infiltrada no solo (ou seja, diminuição da umidade) e menos nutrientes. Neste caso, com a compactação, mais chuva gera mais erosão (pois a água não infiltra e fica na superfície), entretanto menos chuva também gera menos umidade do solo aumentando a sua degradação, isto porque anos de seca aumentam a perda de solo pela erosão do vento. Levando em consideração o conjunto desses danos, a degradação do solo pode se transformar em um processo de desertificação, com perdas permanentes para a produção agrícola (VENI, SRINIVASARAO, *et al.*, 2020).

No caso do Nordeste brasileiro a situação se torna ainda mais crítica, pois a exaustão severa do carbono orgânico é um processo mais intenso nas regiões semiáridas tropicais que afetam diretamente a saúde do solo (VENI, SRINIVASARAO, *et al.*, 2020, p. 751). Nesses ambientes, a mudança climática com alta temperatura e baixa precipitação (ou com padrões erráticos) agravam o cenário, tornando um desafio manter carbono orgânico no longo prazo (VENI, SRINIVASARAO, *et al.*, 2020, p. 751).

Mesmo que todas essas particularidades do solo não sejam trabalhadas, deve-se entender que culturas específicas possuem especificidades de temperatura e chuva que também afetam o seu crescimento ótimo. A soja, por exemplo, tem crescimento apropriado entre 20° C e 30° C, contudo temperaturas acima 40° C podem causar problemas de desenvolvimento vegetal. De forma adicional, a escassez de água ou seu excesso podem prejudicar igualmente o crescimento da planta, dependendo do período no seu ciclo. Desta forma, a necessidade máxima de água, tendo em vista todas as etapas e ciclos de crescimento da soja chega a 7 a 8 mm/dia (AVILA, FARIAS, *et al.*, 2013). Logo, tanto temperatura quanto água de mais ou de menos afetam a produtividade agrícola das mais diversas culturas de acordo com suas particularidades.

Por último, deve-se observar que a redução da arabilidade das terras, proveniente de danos com a mudança climática, acompanhada do impacto na oferta de alimentos gerarão questões conflituosas cada vez mais intensas pelo uso de terras produtivas: por um lado culturas para a alimentação e do outro culturas energéticas²² (*energy crops*) (MARENGO, CUNHA, *et al.*, 2019, p. 146), ou seja, mais pressão sobre a oferta mundial de alimentos ²³. Isto ajuda a

²² Culturas utilizadas exclusivamente para a produção de bioenergia.

²³ A oferta de alimentos abarca também a criação de gado, porém como a definição dos rebanhos em capital físico ou circulante dependendo do seu uso final faz com que detalhes sobre a pecuária não seja abordada de forma extensiva nesse trabalho. Mesmo assim destaca-se que os problemas observados de produtividade agrícola também afetam culturas utilizadas como ração na pecuária, logo todos os problemas na produção agrícola alcançam a produção pecuária por consequência. Além disso, as mudanças climáticas também atingem diretamente a

pensar como as secas ou os demais eventos extremos vão definir os episódios de crescimento? (CHANDY, 2023).

2.3.3. Capital Físico (K)

Ao isolar os efeitos do clima na terra, já é possível se concentrar nas particularidades inerentes ao capital físico, contudo os eventos extremos tratados até o momento não são excludentes quando o assunto é o impacto em ambos os *inputs* N e K da equação (1).

Considerando os episódios de seca e de extremo calor observados com o Aquecimento Global, os efeitos sobre o capital físico têm o potencial para causar problemas em cenários muito mais agregados ou ampliados *vis-à-vis* do capital natural, ou seja, pode ser sentido de maneira mais uniforme no país como um todo. Isto significa que, enquanto as plantações do semiárido podem ser localmente mais impactadas devido aos problemas pluviométricos em relação às áreas mais úmidas, no caso do capital físico a ausência de chuvas pode incorrer em problemas de energia sentidos nacionalmente.

Se a matriz energética de uma nação for predominantemente hidrelétrica, então o mercado de energia nacional dependerá seriamente, além da capacidade de geração instalada, da oferta de água para os reservatórios e, conseqüentemente, sofrerá implicações de um ciclo hidrológico descompassado, como no caso de secas (SCHAEFFER, SZKLO, *et al.*, 2012, p. 2). Porém, mesmo que as energias renováveis avancem, tendo em vista a pressão por um “*mundo mais verde*”, a insegurança estrutural permaneceria elevada pois os problemas neste setor incluem outras forças da natureza como ventos (cenários com ventos muito fortes as torres eólicas acionam dispositivos de segurança que automaticamente param suas hélices) e raios solares (efeitos como nível de insolação, variação de radiação e condições ambientais), eventos que podem reduzir a produtividade energética (SCHAEFFER, LUCENA, *et al.*, 2019, p. 149). Em suma, as mudanças climáticas podem, a partir de diversos caminhos, afetar a capacidade de geração energética.

Mas se por um lado a seca pode provocar problemas, a situação diametralmente oposta também significa sérios problemas de insegurança no setor de energia. Similarmente, a situação energética anterior, no caso de ocorrerem ventanias e chuvas torrenciais, os efeitos colaterais

produtividade pecuária por doenças, problemas de reprodução animal, problemas metabólicos, disponibilidade de água, produção leiteira, etc (KEBEDE, 2016; ROJAS-DOWNING, NEJADHASHEMI, *et al.*, 2017; TIRUNEH e TEGENE, 2018; MADZIGA, 2021).

principalmente no meio urbano significam falta de acesso à internet (crítico para o modelo econômico moderno, cada vez mais conectado), vias alagadas (problema para locomoção de pessoas, produtos e acesso ao setor de serviços e serviços essenciais, como saúde) ou quedas de energia, como ocorrido no ano de 2024 em São Paulo e que provocam os mais diversos prejuízos econômicos e sociais. Nessa situação, a capital paulista permaneceu com aproximadamente 1,35 milhões de pessoas sem eletricidade, mesmo um dia após a queda de energia (FOLHA DE SÃO PAULO, 2024) e 100 mil eram afetados após 5 dias (TERRA, 2024).

De modo geral, todas as situações acima geram prejuízos econômicos, principalmente na indústria, devido a logística de escoamento prejudicada e setor serviços, que possui limitações de acesso da população e danos ao estoque que dependem de ilimitada oferta energética, como é o caso de estoque que precisam permanecer refrigerados. No entanto, estes casos também acompanham perdas sociais sensíveis, como a falta de acesso a hospitais por alagamentos ou aparelhos médicos críticos para a vida de indivíduos, que consomem energia durante todo o dia.

Como será observado na subseção abaixo, as ondas de calor que estão fortemente ligadas ao processo de Aquecimento Global proporcionam um forte desconforto térmico na população mundial. Por consequência, meios de resfriamento para atenuar este processo exige uma alta demanda de energia, como por exemplo ar-condicionado, mas que pode levar a ultrapassagem da capacidade energética nas plantas nacionais instaladas. Esse fenômeno de “excesso de demanda” por energia elétrica frente a oferta nacional pode proporcionar eventos cada vez mais frequentes de apagões e gerar os problemas já citados previamente (ISON, 2019; HANNAM, 2023; BBC, 2024; REUTERS, 2024; CNN, 2024).

Além da questão energética, as secas e chuvas extremas podem influenciar outros aspectos do capital físico. Como informado no início desta seção, por mais que se tente isolar os efeitos em N e K da equação (1), muitas consequências do clima podem se interrelacionar entre os fatores. No caso da produção agrícola, além da oferta de terra, na maior parte dos casos também existe a adição de maquinário e equipamentos (plantadeiras, colhedeira, etc) no processo produtivo deste setor. Sendo assim, quando ocorrem as quebras de safras, resultantes de interferências climáticas, ocorrerão impactos não somente sobre a terra, mas também danos indiretos ao capital físico. Nesta situação, sob o ponto de vista financeiro, os problemas na produção significam problemas na amortização de investimentos realizados pelos produtores em capital físico e que ainda precisam ser pagos. Isto ocorre pois os custos fixos independem

da quantidade produzida, ou seja, com os choques climáticos há um aumento tanto da pressão pelas dívidas acumuladas, quanto da incerteza sobre novos investimentos em K , tendo em vista o risco com o clima (LISBOA, 2025).

Por outro lado, existem impactos diretos e unicamente observados no capital físico (sem relação com os problemas do capital natural). A esse respeito, em situações de chuvas torrenciais, ventanias, furacões ou ciclones, a infraestrutura pode ser altamente comprometida com as destruições de silos, armazéns, estradas e pontes, por exemplo. Além disso, a ocorrência destas mesmas catástrofes pode afetar construções residenciais, prédios e estabelecimentos comerciais. Neste último caso, os danos vão além da estrutura do estabelecimento, pois tendo em vista certos setores de serviços, os choques climáticos danificam capital essencial para a sua produção, como geladeiras, fogões, computadores e veículos de entrega, entre outros.

Da mesma forma, a questão do aumento no nível marítimo é fortemente associada às alterações climáticas modernas e está presente nas mais importantes discussões internacionais sobre o tema. O aumento médio no nível do mar cresceu mais rapidamente no século passado do que em todos os três últimos milênios e tem sido cada vez mais atual ao apresentar um processo acelerado desde os anos de 1960, que continuará crescendo até ao menos 2100 (IPCC, 2021, p. 1216). Por mais que seus pormenores foram tratados na seção 2.2 é importante destacar que em consequência a um aquecimento de 3° C a 4° C, o aumento nos níveis marítimos resultará em dezenas a centenas de milhões de pessoas sendo atingidas por alagamentos a cada ano. As principais prejudicadas em toda esta história serão as cidades costeiras, como são os casos da maioria das capitais brasileiras, e as pequenas ilhas (IPCC, 1992, p. 26; STERN, 2006, p. 77). Vale destacar ainda que, os mesmos choques absorvidos pelo capital físico em eventos extremos como chuvas torrenciais e furacões, podem ser observados nos casos do aumento no nível do mar. Logo, tendo em vista toda estrutura turística em áreas litorâneas, com restaurantes e hotéis, o avanço marítimo nestas localidades fará com que boa parte do capital físico empregado seja perdido e, conseqüentemente, toda a produção econômica seja gravemente afetada.

2.3.4. Trabalho (L) e Capital Humano (H)

Finalmente, mas com igual relevância, estão os dois últimos fatores produtivos da equação (1): o trabalho e capital humano. Mesmo que nesta seção os impactos climáticos serão considerados para ambos os *inputs*, deve-se considerar que ambos são indubitavelmente diferentes.

Em linhas gerais o capital humano como apresentado pelo referencial pertinente é a mão de obra que possui uma acumulação de conhecimento, seja considerando basicamente como estoque de escolaridade e treinamento recebido (um egresso de curso técnico ou faculdade, por exemplo) (SCHULTZ, 1964; BECKER, 1964; MINCER, 1974) ou na dedicação do trabalhador na produção de um bem específico até sua especialização, também chamado de *learning-by-doing* (LUCAS, 1988). Sendo assim, este fator de produção possui um nível de conhecimento ou educação muito maior, o que pode significar maior produtividade. Ainda assim, em consonância com o que foi exposto na seção 2.3, de apenas observar os problemas que podem atingir os *inputs* na função de produção, a análise conjunta considerando ambos (*L* e *H*) como um único fator trabalho (a menos que seja explicitado contrário) não trará prejuízos, pois há compartilhamento dos mesmos danos²⁴.

Posto isso, as mudanças climáticas vêm impondo desafios crescentes aos fatores de produção trabalho (*L* e *H*), afetando tanto a sua quantidade quanto a sua qualidade, com os impactos se manifestando de múltiplas maneiras devido o advento de eventos climáticos cada vez mais críticos. Quanto ao aumento da temperatura e das chuvas, existe a formação de um ambiente propício para a expansão de doenças transmitidas por vetores, sobretudo em regiões de países subdesenvolvidos ou em desenvolvimento, como malária, dengue, filariose linfática, esquistossomose, leishmaniose, oncocercose (cegueira dos rios), leptospirose, entre outras (IPCC, 1992; STERN, 2006; SOUZA HACON, OLIVEIRA e SILVEIRA, 2019)²⁵. Mesmo que não seja através da elevação da temperatura por si só, mas pelo aumento de incidência da radiação UV-B na Terra (devido aumento na degradação da camada de ozônio) há aumento nos problemas de saúde ligados ao sistema de imunossupressão, visão humana e crescimento nos casos de câncer de pele (IPCC, 1992), especialmente em trabalhadores que atuam ao ar livre.

Diante disso, o conjunto dessas doenças afeta diretamente o trabalhador ao reduzir sua capacidade física e por consequência sua produtividade (e até mesmo a sua atividade produtiva a depender do fenômeno climático). Contudo, há de se considerar aspectos da saúde mental e eventos extremos, que podem parecer não conectadas. Há cada vez mais pesquisas indicando o aumento da relação entre a mudança climática e saúde mental no mundo (BOURQUE e WILLOX, 2014; OBRADOVICH, MIGLIORINI, *et al.*, 2018; NIE, ZHAO, *et al.*, 2024; MITCHELL, MAHEENB e BOWENB, 2024). Estudos como os de Vins, Bell *et al* (2015) e

²⁴ Análises particulares para cada um dos fatores serão trabalhadas na próxima seção.

²⁵ Para esclarecimento de cada uma destas doenças consulte (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2025a)

Fleming-Muñoz, Whitten e Bonnett (2023) mostram que pelo advento da seca, doenças mentais como mudanças de humor pelo estresse, suicídio e depressão, podem apresentar aumento de casos²⁶. Além disso, Thompson (2023) mostra que há o aumento de evidências indicando que o aumento ou variabilidade na temperatura estão associados com o aumento de casos de suicídio ou comportamento suicida. Ainda deve se destacar que tais problemas não devem, necessariamente, ser vistos como exclusivos da massa trabalhadora consolidada, em outras palavras, apenas para adultos. Isto porque análises feitas por Hadfield, Sulowska *et al* (2025) mostram que adolescentes madagascarenses estavam extremamente ansiosos e deprimidos (ansiedade climática) devido aos efeitos climáticos sobre a perda de recursos domésticos e a incerteza que isso trazia sobre o futuro. Logo, tendo em vista que a saúde mental reduz radicalmente a capacidade cognitiva e funcional do trabalhador, todos os efeitos climáticos neste contexto mental comprometem a estabilidade e eficiência no emprego.

Anteriormente, na subseção relacionada ao Capital Natural, foi antecipado que problemas climáticos sobre o solo podem levar a prejuízos agrícolas e, conseqüentemente, comprometimento na oferta de alimentos. Porém, por mais que as análises edafológicas já tenham sido esclarecidas, existem relações intra-fatoriais da equação (1) que não foram elucidadas, isto é, quais são as conseqüências da falta de alimentos nos *inputs* trabalho e capital humano?

Talvez a mais clara conseqüência de crises na oferta de alimentos seja a má-nutrição gerada sobre os indivíduos, principalmente em países em desenvolvimento (MEADOWS, MEADOWS, *et al.*, 1973, p. 45; IPCC, 1992, p. 105) e com maior gravidade nas crianças (STERN, 2006, p. 97; ARCHER e RAHMSTORF, 2010, p. 178). Lloyd, Kovats e Chalabi (2011) estimam que as mudanças climáticas levarão a um aumento no nanismo moderado (causado por problemas de nutrição) até 2050 *vis-à-vis* ao cenário sem alterações climáticas. Sob esta ótica, Alderman, Hoddinott e Kinsey (2006) mostram que melhorias na altura relativas a crianças em idade escolar, promove um aumento nas séries escolares concluídas, ou seja, pode gerar avanços na formação de capital humano. Em situações extremas de secas, como vividas pela região semiárida brasileira, pode-se ver como a escassez de alimentos pode gerar

²⁶ Como exemplo, imagine no caso da agricultura de subsistência: na presença de uma seca severa, todo o estoque de alimentos e fonte de renda de uma determinada família pode simplesmente acabar. Na ausência de políticas sociais para a proteção desses indivíduos, a pressão financeira e mental tende a se torna enorme. Isso pode levar ao aumento de estresse, ansiedade e depressão por parte dos provedores. O que comer? Como conseguir dinheiro? Além disso, todos esses pensamentos podem, entre outras coisas, levar a prática de roubos e furtos como forma de conseguir sustento.

sofrimento ao acompanhar o testemunho encontrado em Guerra (1981, p. 25): “[...] na era de 44 (1744) houve uma segunda seca; nesta morreram os gados a acabar e a fome no povo foi considerável, de sorte que meninos que já andavam tornaram ao estado de engatinhar”. Assim a má-nutrição reduz a capacidade e resistência física, a capacidade de aprendizado e a produtividade dos indivíduos, estabelecendo um ciclo vicioso de pobreza e baixa eficiência do fator trabalho. Tanto que nas políticas de mitigação empregadas no Nordeste brasileiro, denominadas de *frentes de trabalho*, era necessário fazer o pagamento duas vezes ao dia, uma antes do almoço e outra antes do jantar (GUERRA, 1981, p. 51), tamanha era a precariedade alimentar e seus efeitos produtivos.

Mesmo assim, com todos os problemas já tratados neste estudo, provavelmente o cerne das mudanças climáticas no imaginário popular seja apenas um: o calor. As ondas de calor são a concretização de todos os problemas do clima, enquanto efeito colateral das mudanças climáticas. Podem ser entendidas de forma simplificada como eventos climáticos caracterizados por temperaturas extremamente altas, que superam a média esperada no tempo e espaço (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2025). Neste caso não importa a região no mundo sob foco, pois até 2050 as projeções climáticas mostram que todas elas vão experienciar aumento no aquecimento, aumento no calor extremo e decréscimo nos períodos de frio (IPCC, 2021, p. 1851). Indo além, Coffel, Horton e De Sherbinin (2018) concluem que a quantidade de dias mais quentes em relação a quantidade que costumava ser vista, pode aumentar de 100 a 250 vezes até 2080 e 1 milhão de pessoas por dia podem ser expostas a uma temperatura acima de 35° C.

Como resultado, surgem também os aumentos em problemas de saúde e problemas fisiológicos correlacionados ao desconforto térmico. Observando os problemas fisiológicos, no Quadro 1, detectam-se as consequências corporais, como é o caso de câibras, insolação e exaustão. Expandindo o raciocínio, também é constatado que os episódios de calor extremo podem provocar problemas de saúde mental (EBI, CAPON, *et al.*, 2021; MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2025) e casos fatais entre os indivíduos, por conta de desidratação grave, insolação grave, golpe de calor e agravamento de morbididades (como condições cardíacas e respiratórias) (EBI, CAPON, *et al.*, 2021; BALLESTER, QUIJAL-ZAMORANO, *et al.*, 2023; NIRANJAN, 2024; MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2025).

Quadro 1 – Classificação do Índice de Calor e seus efeitos nos seres humanos

Classificação	Índice de calor*	Efeito no corpo
Cuidado	26°C - 32°C	Fadiga possível com exposição prolongada e/ou atividade física
Cuidado Extremo	32°C - 39°C	Insolação, câibras ou exaustão pelo calor possíveis com exposição prolongada e/ou atividade física
Perigo	39°C - 51°C	Câibras de calor ou exaustão pelo calor prováveis, e insolação possível com exposição prolongada e/ou atividade física
Perigo Extremo	52°C ou superior	Insolação altamente provável

Fonte: NATIONAL WEATHER SERVICE (US GOVERNMENT)

Nota (*): originalmente o índice é apresentado com a temperatura em fahrenheit. Os valores em celsius apresentados são aproximações.

Em decorrência desses problemas a capacidade produtiva do trabalho também é diretamente atingida. Assim, em casos de exaustão ou confusão mental, as capacidades cognitivas dos trabalhadores são reduzidas, e muito, a sua produção média. Dunne (2013) estima que o estresse térmico já reduziu a capacidade de trabalho para 90% nos meses mais quentes ao longo das últimas décadas e vai reduzir para 80% nos meses com maior calor até 2050. Entretanto, além da diminuição no potencial produtivo, não se pode esquecer que as mortes além de trágicas afetarão o crescimento econômico no longo prazo por conta de problemas na acumulação do fator trabalho em determinados locais.

Finalmente, mas não menos importante, destaca-se que o capital humano, como definido anteriormente, se beneficia de localidades mais ricas e estruturadas, capazes de criar um ambiente com maiores oportunidades de estudo ou outra forma de acumulação do conhecimento. Por conseguinte, estes trabalhadores, em média, estão alocados em posições profissionais que oferecem melhores condições de trabalho (como indústrias manufatureiras bem ambientadas ou escritórios com ar-condicionado ou jornadas flexíveis). Em contrapartida, as áreas mais vulneráveis, que operam com uma função de produção baseada em mão de obra sem especialização (*L*), vão sofrer maiores impactos diretos das alterações climáticas, com riscos crescentes de insolação, exaustão térmica, desidratação e morte. Logo, os trabalhadores de baixa renda (que possuem baixa educação), sem acesso às boas condições de trabalho e muitas vezes com emprego ao ar livre, serão os mais atingidos.

Na zona rural, a situação pode ser ainda mais desafiadora, pois os prejuízos climáticos frequentemente atingem a subsistência das famílias. Nesse contexto e lembrando o que já foi dito anteriormente, por limitações físicas de disponibilidade de terras, a migração torna-se

muitas vezes a única forma viável de adaptação para parte da população, seja indo para as capitais ou para outras regiões em busca de melhores condições (GUERRA, 1981, p. 25; VIANA JÚNIOR, 2020). Contudo, abre-se uma janela para novos problemas nas cidades de origem e nas receptoras. As localidades de origem, ao se esvaziarem, perdem força de trabalho e agentes econômicos, comprometendo seu potencial produtivo. Por consequência, existe uma redução na capacidade de geração de poupança local, enfraquecimento da demanda e impactos negativos na formação de capital humano, o que configura um ciclo vicioso em regiões já vulneráveis por limitar tanto os investimentos quanto a sustentação do mercado local²⁷. Por outro lado, as famílias que migram tendem a se estabelecer em áreas urbanas igualmente precárias, contribuindo para a sobrecarga dos serviços básicos, ampliando demandas por assistência social e, em certos contextos, agravando problemas de violência urbana (ARAÚJO e COSTA, 2015; ALVES, 2016; DE MARIA, 2019). Portanto, considerando os impactos já conhecidos das crises climáticas, a ausência de ações governamentais voltadas à adaptação e mitigação tende a intensificar a pobreza nas áreas rurais e a agravá-la nos centros urbanos que já enfrentam sérias vulnerabilidades socioeconômicas.

2.4. CLIMA E DESIGUALDADE

Até este ponto, este trabalho procurou apresentar não só as características do processo da mudança climática em curso, mas também suas consequências sobre a realidade dos fatores de produção. Diante desse quadro, não resta dúvida que a capacidade produtiva, nos mais diversos níveis territoriais e fatoriais, irá sofrer com as mudanças climáticas no longo prazo. Contudo, ainda que este trabalho não se aprofunde sobre questões específicas de desigualdade econômica e social nos próximos capítulos, um ponto merece atenção: todos os territórios e camadas sociais irão sofrer na mesma proporção? Esta indagação chega num ponto importante dos estudos econômicos e sociais das mudanças climáticas, exatamente por inserir, nas discussões vistas até o momento, a percepção de desigualdade econômica e social.

No âmbito internacional, Rasmussen (2004), Toya e Skidmore (2007), Noy (2009), Raddatz (2009) e Zaveri, Damania e Engle (2023) já mostraram que países mais pobres ou em desenvolvimento tem maior sensibilidade aos danos das secas. Além disso, como apresentado

²⁷ Da mesma forma, no âmbito da migração internacional relacionado ao clima, os autores Burzyński, Docquier e Scheewel (2021) mostram que se houver relaxamento de restrições migratórias pode haver uma intensificação no efeito da pobreza das mudanças climáticas nos locais de origem dos imigrantes. Como os mesmos autores destacam, a resposta migratória internacional Sul-Norte é tipicamente de “fuga de cérebros”, ou seja, imigração de capital humano.

por Morton (2007) alguns dos mais importantes impactos nas mudanças climáticas serão sentidos entre as populações dos países em desenvolvimento, em especial, na agricultura de subsistência. Desse mesmo modo, Harvey, Saborio-Rodríguez *et al* (2018) mostram, por exemplo, que pequenos fazendeiros são os mais atingidos pela mudança climáticas. Já na visão do Fórum Econômico Mundial (2023) países com menor renda produzem aproximadamente 10% das emissões, mas são os mais fortemente impactados pela mudança climática. Em Paglialunga, Coveri e Zanfei (2022) os autores relatam que o crescimento das anomalias de temperatura e precipitação tem efeitos adversos significantes na desigualdade intra-países.

Estes são só alguns trabalhos que seguem a perspectiva na qual os mais pobres apresentam um sofrimento maior com os impactos causados pela mudança climática. Mas qual o motivo dessa situação? A questão geográfica, marcada pelo fato de que os países mais pobres estão majoritariamente localizados nas regiões mais quentes do globo, em latitudes mais baixas, constitui como um ponto relevante para a resposta. Contudo um outro ponto chave, que ainda não foi abordado, diz respeito à heterogeneidade dos efeitos climáticos na economia, a qual pode ser compreendida a partir da capacidade de adaptação e mitigação destes problemas.

Por mais que as últimas palavras aparentam ser equivalentes, seus sentidos são exatamente o oposto uma da outra. Existem algumas definições de ambos os termos disponíveis na bibliografia pertinente, porém para este trabalho será entendido que mitigação é uma intervenção humana para combater as causas de um problema, que no caso das mudanças climáticas seria reduzir as fontes de emissão dos gases danosos ou aumentar os sequestradores de gases do efeito estufa (IPCC, 2001). Quanto à adaptação, esta pode ser vista como uma estratégia que visa a convivência com o problema e todas as consequências associados a ele, ou seja, combate aos efeitos do problema (ROHLI e VEGA, 2018, p. 320), similar ao observado nas políticas do DNOCS no Nordeste brasileiro²⁸. As duas políticas tem suas críticas, a primeira por ser muito cara e a segunda pelo impacto que precisa ser suportado integralmente após o dano, entretanto deve ficar claro que não são alternativas umas a outras, na verdade é consenso entre os especialistas que ambas são essenciais (ARCHER e RAHMSTORF, 2010, p. 185).

A capacidade de mitigar e principalmente adaptar-se aos problemas climáticos vão produzir muitos efeitos econômicos importantes entre os agentes econômicos. Por exemplo, na situação descrita por Malthus (1798) da projeção alarmante de escassez alimentícia perante o

²⁸ Dentre estas políticas podem ser observadas a construção e manutenção de barragens (DNOCS, 2024), a perfuração de poços (DNOCS, 2025a), cisternas (DNOCS, 2020), ações na aquicultura, irrigação e capacitação (DNOCS, 2025b), entre outras.

aumento populacional, não foi levado em conta a adaptabilidade humana de criar tecnologias de maximização da produtividade agrícola. Da mesma forma Mendelsohn (2009) mostra que está em curso uma superestimação dos danos climáticos, nos quais os modelos que projetam estes efeitos não levam em conta a capacidade adaptativa das pessoas. Em comum estas situações mostram que os fatores produtivos podem auxiliar na adaptação dos percalços, em especial no tocante à PTF.

Como já explicado, a Produtividade Total dos Fatores²⁹ pode ser entendida como um fator residual, que descreve a parte do crescimento do produto total não justificada por aumentos na utilização dos demais fatores de produção, capital e trabalho. Além disso, por mais que seja uma simplificação, previamente já se observou que sua constituição é altamente complexa, integrando questões político-institucionais, tecnologia, infraestrutura social, qualidade do mercado financeiro, entre outras. Sob uma perspectiva adaptativa, observa-se que o tema já ocupa um espaço significativo na discussão, como se pode perceber nos exemplos a seguir.

Segundo Mukherje e Fransen (2024) a eficiência dos mercados constitui uma ferramenta relevante para contornar os impactos causados pelo clima. Para estes autores há variabilidade significativa na relação entre diferentes escalas de fazendas e os problemas do clima, contudo elementos como estruturas sociais e acesso ao crédito impactam na escolha dos agricultores permanecerem produzindo. Além do mais, mesmo sem recorrer aos mercados financeiros, Aragón, Oteiza e Rud (2021) revelam que medidas simples, como aumentar a área plantada e mudar o mix de culturas produzidas para reduzir os riscos, podem atenuar os problemas com o clima.

Entretanto, mesmo as soluções mais simples, enfrentam obstáculos para implantações em diferentes tipos de locais. No caso do mercado de capitais é intuitivo dizer que dependem diretamente de uma estrutura econômica minimamente consolidada. Para as medidas citadas por Aragón, Oteiza e Rud (2021) é necessário grande oferta de terra arável e ambiente oportuno para produção de diferentes sementes. Em todos os casos, as localidades economicamente mais vulneráveis e/ou com ambiente hostil acabam saindo atrás com a emergência das mudanças climáticas.

²⁹ O A da equação (1)

Indo além nos constituintes da PTF, as instituições possuem papel chave para o entendimento nos diferentes níveis de enfrentamento, e por consequência perdas, das regiões afetadas. Para North (1991) as instituições são as regras criadas pelos seres humanos que estruturam as interações políticas, ou seja, são as regras do jogo. Elas podem consistir em regras formais, como as constituições e leis, ou informais, como costumes e tradições³⁰.

Dito isso e tendo em vista a inclusão das instituições na PTF, autores como North (1990), Acemoglu, Johnson e Robinson (2001) e Acemoglu e Robinson (2012) mostram que países com herança de instituições extrativas, como é o caso brasileiro, perpetuam a pobreza. A esse respeito, a persistência da pobreza pode ser vinculada as ações atreladas a essas instituições que reduzem investimento e dificultam a inovação ao manter o *status quo*. Sendo assim as instituições mais fracas acabam se associando a problemas graves de recuperação depois de algum choque, inclusive os climáticos (CHANDY, 2023), tendo em vista a inflexibilidade institucional.

Como exemplo, imagine a realidade dos municípios do Nordeste brasileiro, com atenção especial para aqueles localizados no semiárido nos séculos passados (outrora chamado de Polígono da Seca). Seguindo o descrito em Furtado (2007) e Amaral Filho, Penna e Vieira (2021, p. 19-20), esta região possuía um sistema econômico baseado no tripé gado-algodão-cultura de subsistência, desenvolvido em grandes latifúndios com um modo de produção de baixo nível tecnológico e mantido por uma relação de trabalho extrativista.

Neste cenário, a imagem institucional se confunde com a definição da instituição extrativa de Acemoglu, Johnson e Robinson (2001), isto é, de instituições modernas fracas ou, tendo em vista a equação (1), PTF mais baixa. Além do mais, a região semiárida sempre foi marcada por secas³¹, contudo, devido à sua estrutura institucional oligarca, onde se preservava o poder dos grandes proprietários e do clientelismo político, apenas quem possuía acesso à distribuição de recursos (obras de acesso a água, crédito ou outras ajudas governamentais) eram a elite local ou quem mais tivesse afinidade com esta elite. O Estado, como organização de financiamento para políticas públicas, ficava confinado a um ator de ações paliativas de curtíssimo prazo, medidas assistenciais, como as frentes de trabalho ou auxílio financeiro³², e

³⁰ Um exemplo claro é a estrutura social encontrada no Nordeste em séculos passados (GTDN - GRUPO DE TRABALHO PARA O DESENVOLVIMENTO DO NORDESTE, 1959)

³¹ Só no século 19 houve 9 grandes secas, 1 a cada 11 anos aproximadamente (GUERRA, 1981, p. 25)

³² (GTDN - GRUPO DE TRABALHO PARA O DESENVOLVIMENTO DO NORDESTE, 1959; GUERRA, 1981)

que nada alteravam a realidade vivida pelo agricultor de subsistência para a próxima seca³³. Logo, a cada ciclo de seca, se repetia o atraso vivenciado por boa parte da população, a mercê dos choques climáticos, retornando a níveis de produtividade baixíssimos e ao preço de uma “indústria da seca”³⁴ que conservava o bem-estar de poucos.

Atualmente, já existem algumas obras no Nordeste que contrastam com a lógica observada anteriormente. Entre as que merecem destaque está a transposição do Rio São Francisco. Por meio de investimentos federais, seu objetivo principal é oferecer segurança hídrica aos estados mais vulneráveis e viabilizar uma melhor gestão hídrica, na medida em que completará os açudes estratégicos em momentos de déficit hídrico e reduzirá as diferenças regionais causadas pela oferta desigual de água entre as populações (AMARAL FILHO, MELO, *et al.*, 2011, p. 149; MOUTINHO, CAMPOS, *et al.*, 2011, p. 229).

Entretanto, como já observado, a infraestrutura, isoladamente, não assegura o êxito; ela é apenas um dos elementos a serem considerados dentro de um conjunto mais amplo de desafios, que envolve, inclusive, as instituições. Mesmo com obras semelhantes às do Rio São Francisco, a presença de instituições arcaicas no controle da gestão tendem a perpetuar os mesmos resultados insatisfatórios do passado. O caso do Ceará é um exemplo de modelo a ser seguido para que isso não ocorra. O reconhecido sucesso na gestão dos recursos hídricos deste estado se inicia com reformas político-institucionais ocorridas a partir de 1987, que romperam com o clientelismo político, visto até então, a favor da repartição mais democrática dos benefícios econômicos (AMARAL FILHO, 2003, p. 12).

Esta nova estrutura de governança dos recursos hídricos passa a se basear na introdução de uma racionalidade mais técnica e científica em conjunto com um novo aparato legal (“regras do jogo”) que da força normativa ao Plano Estadual de Recursos Hídricos (PERH)³⁵. Isso assegura que, por serem cientificamente embasadas, as políticas de adaptação sejam mais eficazes aos problemas locais. Além disso, ao modernizar as instituições, as externalidades

³³ Muito pelo contrário, as vezes esse tipo de política poderia ficar mais difícil de ser aplicada com o aparecimento das secas, pois cada vez mais vagas de empregos precisariam ser abertas para cobrir o aumento de vulneráveis (GUERRA, 1981, p. 36)

³⁴ Termo criado pelo jornalista Antônio Callado.

³⁵ Destacam-se a Lei nº 11996/92 que dispõe sobre a Política Estadual de Recursos Hídricos, quase 5 anos antes da promulgação da Lei nº 9433/97, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, além do Decreto nº 23067/94, que cria o Sistema de Outorga para Uso da Água. Este decreto reforça o entendimento da água como recurso limitado, com papel no desenvolvimento socioeconômico e que deve ser racionalizada para sua conservação e proteção (entre outras coisas).

positivas alcançadas pelas obras de infraestrutura são maximizadas, ou seja, estendem-se ao bem-estar de um maior número de agentes e não somente uma elite.

Num outro aspecto dessa discussão, além das regras do jogo (instituições), observa-se que os *players*, ou as organizações dentro do ecossistema institucional, também tem papel preponderante no quesito de proteção climática. Como visto acima, a partir do planejamento estatal é possível minimizar ou não os choques advindos das mudanças no clima. Porém, além desse fator, uma questão hierárquica com o qual os entes federativos devem agir sobre os problemas também deve ser colocada em pauta, isto é, a relação municípios, unidades federativas e União.

Para exemplificar melhor este ponto, observe que a seca não possui uma data inicial bem definida, diferentemente de outros desastres naturais, como as inundações, furacões ou ciclones. Por mais exata que seja a estimativa, seu início é sempre nebuloso pois só pode ser medido com o uso de análises *a posteriori* dos índices relativos a este problema. Tendo isso em vista, quanto mais próximos no espaço dos danos causados pela seca, mais cedo os problemas climáticos em curso podem ser percebidos pelos entes federativos. No caso do poder público, os municípios são estes entes mais próximos em comparação aos estados e a União. Contudo, não se pode perder de vista a heterogeneidade encontrada dentro do corpo do ente municipal no Brasil no que diz respeito à dotação de fatores, produto interno e renda interna. Essa heterogeneidade pode ser verificada nos vários níveis diferentes de PIBs e na falta de convergência entre os mesmos (FERREIRA e ELLERY JR., 1996; AZZONI, MENEZES-FILHO, *et al.*, 2000). Tais diferenças, sob a ótica das reações e da aplicação de políticas de mitigação, pode fazer com que os municípios mais pobres sofram relativamente mais no longo prazo, em vista das limitadas capacidades em controlar os danos climáticos *vis-à-vis* entes mais ricos, pois, mesmo que os danos causados sejam absolutos, os custos das políticas serão relativos ³⁶.

³⁶ Levando em conta como as responsabilidades estão distribuídas, entre município, estado e União, veja o exemplo: imagine que há o um município rico e outro pobre (dentro do mesmo estado) com produtos Y_{rico} e Y_{pobre} , respectivamente, e $Y_{rico} > Y_{pobre}$ com funções (2) e (3) abaixo. Além disso, não é absurdo supor que o custo de uma política para oferta hídrica c (como aluguel de caminhão pipa) seja igual para ambos, logo:

$$Y_{rico} = 2\alpha \quad (2)$$

$$Y_{pobre} = \alpha \quad (3)$$

Suponha ainda que c seja função da porcentagem x do PIB:

Sendo assim, os entes menos afortunados vão pagar proporcionalmente uma fatia maior do seu produto, conseqüentemente todo financiamento de políticas públicas voltadas para o desenvolvimento e crescimento econômico serão afetadas pois também advém de um valor proporcional do PIB. Posto isso, por mais que o clima não influencie diretamente a trajetória do desenvolvimento local, a falibilidade da estrutura de financiamentos para mitigação e adaptação podem gerar uma espiral de atraso cada vez maior, tornando cada vez mais difícil a convergência dos produtos municipais.

Indo além nesta “relação hierárquica”, poderia se pensar nas unidades federativas como meio para fornecer estes investimentos. No entanto, em um cenário no qual as mudanças climáticas podem gerar cada vez mais problemas e com maior intensidade, pode haver um ponto no qual os estados incorreriam no mesmo problema anterior, isto é, aqueles com maior chances de sofrer com o clima despenderiam parte do seu produto para políticas de mitigação ao invés de promover o crescimento interno. Da mesma forma, ficariam atrás de outros estados, por exemplo aqueles localizados no Nordeste em comparação aos do Sudeste.

Com base nestes argumentos, defende-se que a responsabilidade pelas políticas de adaptação e mitigação climática devem ser do governo federal. Essa centralização se justifica não apenas pela capacidade de articulação e pelos recursos disponíveis nessa esfera, mas sobretudo para evitar que os impactos das mudanças climáticas gerem choques sucessivos que comprometam o avanço do desenvolvimento econômico interno do país. Diante disso, o “pagamento” pelos estragos provocados pelas mudanças climáticas podem ser socializados entre todos os entes federados, no entanto, no melhor dos casos, é necessário ter um Fundo de Combate aos Efeitos Climáticos, formado em nível federal. De qualquer forma, não se pode deixar as cidades isoladas na aplicação de políticas públicas contra os efeitos da atual crise do clima.

Estes choques climáticos que os municípios enfrentam podem ter efeitos transitórios no produto (pode ser de curto a médio prazo), como nos casos de avanço do mar, inundações ou

$$c = Y_{rico}x_{rico} = 2\alpha x_{rico} \rightarrow x_{rico} = \frac{c}{2\alpha} \quad (4)$$

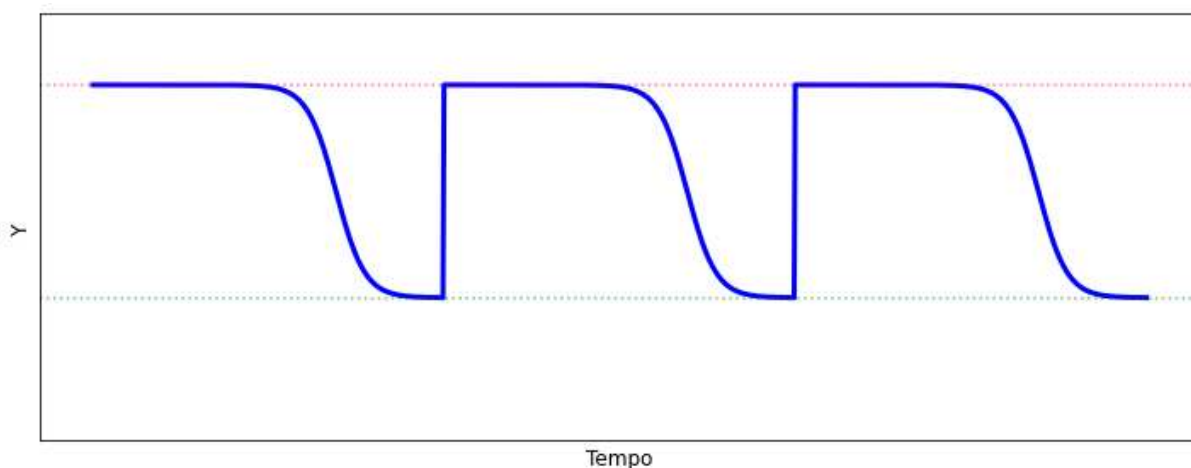
$$c = Y_{pobre}x_{pobre} = \alpha x_{pobre} \rightarrow x_{pobre} = \frac{c}{\alpha} \quad (5)$$

$$\therefore x_{pobre} > x_{rico}$$

Logo o município mais pobre vai demandar uma parte proporcionalmente maior do seu PIB para políticas de mitigação climática.

períodos de aumento na demanda pela energia devido ao calor, como explicitado no Gráfico 1. Em tal cenário, na ausência de políticas para adaptação, o ciclo de destruição-reconstrução se torna frequente e pode fazer com que o processo de desenvolvimento ou crescimento seja sempre interrompido, despendendo em todo período de verbas para remediação dos danos ao invés de preveni-los, não esquecendo que é proporcionalmente mais oneroso para as áreas mais vulneráveis.

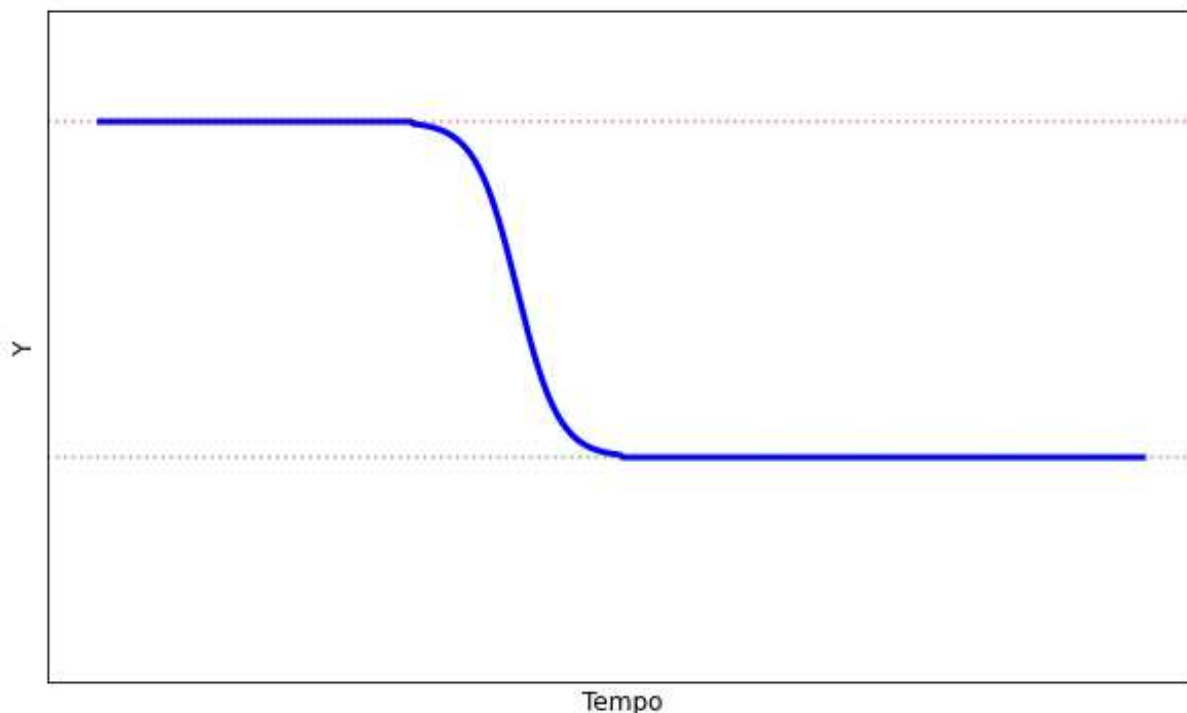
Gráfico 1 – Choques Climáticos Transitórios



Fonte: Elaborado pelo autor.

Entretanto os fatores que levam a danos praticamente permanentes podem indicar uma história mais cruel. Sem a ação correta sobre os fatores que compõem a PTF, os choques climáticos causam muitos problemas, como por exemplo, problema de subsistência, fuga de mão de obra, problemas com formação de capital humano, entre outros que ainda estão por ser vistos. Nesta situação, como mostrado no Gráfico 2, os danos criados pela mudança climática podem se tornar permanentes, isto é, a partir do momento no qual esta economia alcança um novo nível de funcionamento da produção mais baixo nessa economia, a volta para o nível produtivo anterior, mais elevado, torna-se muito difícil devido aos impactos negativos causados no processo produtivo local, como menos poupança, mercado consumidor menor e menos capital humano.

Gráfico 2 – Choque Climáticos Permanentes



Fonte: Elaborado pelo autor.

Logo, entende-se que o Estado brasileiro deve equilibrar sua atuação entre os compromissos internacionais de redução das emissões de gases de efeito estufa e a formulação de políticas internas voltadas à proteção das regiões e populações mais vulneráveis. Pois, caso contrário, chega-se à pergunta: até quando os governos permanecerão em uma “*dança com o Diabo*” envolvendo o clima, sofrendo consequências momentâneas (vislumbrado no Gráfico 1), sem alcançar danos irreversíveis (observado no Gráfico 2)?

2.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este primeiro capítulo teve como objetivo oferecer uma visão ampla das mudanças climáticas, por meio de uma revisão da literatura a qual procura situar os significados do fenômeno das mudanças climáticas e seus efeitos e impactos sobre pessoas e regiões. Nesse contexto procurou-se construir hipoteticamente um modelo descritivo pelo qual se pudesse compreender os impactos das mudanças climáticas sobre o universo de fatores que compõe a função de produção agregada de uma economia para, a partir daí, inferir os impactos desse fenômeno sobre as forças econômicas e sociais das regiões e territórios.

Deduz-se que, uma vez afetadas as forças produtivas localizadas não são atingidas de maneira uniforme. Entre os diversos impactos, destaca-se o agravamento das desigualdades,

com efeitos particularmente severos sobre regiões e grupos socioeconomicamente mais vulneráveis, como áreas geograficamente fragilizadas, do ponto de vista físico, como também, e por consequência de suas populações, em particular os trabalhadores braçais, agricultores familiares e moradores de áreas de risco, que dispõem de menos recursos e capacidade adaptativa diante dos choques climáticos, que estão se ampliando.

Por fim é necessário que, no caso brasileiro, o governo federal mantenha sua inserção e compromisso internacional em relação às políticas públicas de mitigação dos efeitos das mudanças climáticas, contudo é primordial promover progressivamente as políticas internas de adaptação, caso contrário, estará não só falhando como incentivador do bem-estar social (principalmente para as partes mais vulneráveis da população nacional), como também estará sabotando o crescimento e desenvolvimento futuros do país.

3. ANÁLISE DO IMPACTO CLIMÁTICO DE LONGO PRAZO NA ECONOMIA: O CASO BRASILEIRO DE 1999 A 2019

3.1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas e anos o fenômeno da “mudança climática” tem assumido lugar de destaque nos debates acadêmicos e políticos, seja com o Tratado de Kyoto em 1997, o alerta na campanha presidencial americana por Al Gore ou no seu documentário³⁷, ambos em meados dos anos 2000, ou o Acordo de Paris em 2015, e diversas sinalizações internacionais tem indicado o nível de seriedade que o tema tem levantado. Tal tratamento fez com que o assunto passasse de um conjunto de teses especulativas, que geravam desconfiança no grande público, para se tornar uma questão existencial humana nas próximas décadas e séculos.

Ainda que possa parecer excessivamente dramático considerar esta última possibilidade, a história destaca que o clima já deu sinais de possuir uma capacidade destrutiva. Diferentes civilizações estudadas aparentam ter sofrido com as variações climáticas a ponto de contribuírem para o fim da sua existência, como é o caso dos Maias. Este povo localizado em boa parte da América Central, ficou marcado tanto pela magnitude de seu império quanto por seu fim nas mãos dos colonizadores espanhóis. Contudo, mesmo que os europeus tenham tido grande impacto na sua destruição, boa parte desse trabalho já tinha sido feito pelo clima, mais especificamente as chuvas. Resultado? A redução na oferta de alimentos e água, após anos de um contínuo processo de queda na pluviometria, culminou em diversos conflitos civis que coincidiram com o colapso desta civilização clássica (DAHLIN, 1983; HODELL, CURTIS e BRENNER, 1995; HAUG, 2003; MEDINA-ELIZABETH e ROHLING, 2012; KENNETT, MASSON, *et al.*, 2022).

Já no caso da civilização Angkor, que marcou a Era de Ouro do Camboja e instituída pelo império Khmer, houve destino semelhante. Também apresentando problemas pluviométricos, essa sociedade experienciou décadas de secas, que impactaram a oferta hídrica e a produtividade, entretanto intercaladas com períodos de chuvas torrenciais (chuvas de monções). Estas chuvas excessivas foram igualmente prejudiciais, ao destruir sua infraestrutura hídrica, ou seja, mesmo na ausência de secas, as chuvas precisam estar num ponto ótimo, no qual a precipitação tem a capacidade de gerar benefícios e não um evento extremo danoso (BUCKLEY, ANCHUKAITIS, *et al.*, 2010; PENNY, 2018).

³⁷ Com o nome em português de “Uma verdade inconveniente”.

Claro que danos climáticos podem ser apenas um dos fatores que levam a prejuízos socioeconômicos. Muitas vezes mudanças no clima funcionam como um potencializador dos impactos ambientais causados pelo homem, sendo o caso da civilização moderna. Com a emissão de gás carbônico e problemas causados à camada de ozônio, a temperatura do planeta tende a aumentar gerando ondas de calor cada vez mais nocivas aos indivíduos. Já o desmatamento tem múltiplos caminhos de interação: primeiramente, ao se relacionar com o aquecimento global, pois quanto menos floresta tropical maior é a tendência de uma elevação na temperatura, já que este tipo de bioma possui um efeito de resfriamento (LI, ZHAO, *et al.*, 2015). No segundo caso, percebe-se que o desmatamento, principalmente resultante de uma agricultura extensiva, pode ocasionar danos permanentes na estrutura do solo e influenciar nos efeitos das secas. Tendo em vista que, nesta realidade, não há uso de tecnologia, a utilização desenfreada e até despreocupada com a terra pode resultar na sua erosão e compactação. Em ambas as situações quando há presença de chuvas intervaladas com secas, a umidade em vez de ficar retida no solo, se dispersará devido à sua estrutura compacta e diminuirá ainda mais os nutrientes da terra devido a erosão, entrando numa espécie de círculo vicioso. Economicamente falando, a terra vai se tornando um insumo cada vez mais escasso, prejudicando a população devido a crescente escassez da oferta de alimentos, como foi o caso da sociedade Rapa-Nui, na Ilha de Páscoa³⁸ (DIAMOND, 2007; BAHN e FLENLEY, 2017; LIMA, GAYO, *et al.*, 2020).

Sendo assim, a urgência deste assunto é depreendida exatamente da repetição destes efeitos e impactos na economia e sociedade atuais. As chuvas que outrora serviram como condutor da destruição Angkor, atualmente diminuem a produção econômica (principalmente em países industrializados) (KOTZ, LEVERMANN e WENZ, 2022), com o agravante de que o aquecimento global pode proporcionar fenômenos pluviométricos cada vez mais fortes (KOTZ, LANGE, *et al.*, 2024a).

Logo, é possível confirmar que a discussão voltada para as mudanças climáticas não deve ser abordada apenas como ilusão, conspiração ou exercício hipotético, ainda mais que atualmente as ações antropogênicas estão amplificando os efeitos e, consequentemente, os danos causados pelo clima.

Na concepção econômica, a partir da interação humana com o ambiente se encontra o entendimento de que as mudanças climáticas podem ser consideradas externalidades negativas

³⁸ Além dos problemas causados pelas pessoas, a Ilha de Páscoa ainda sofreu com impactos resultantes do efeito La Niña. (LIMA, GAYO, *et al.*, 2020)

(NORDHAUS, 1992a; NORDHAUS, 1993; STERN, 2006). Logo, sob esta perspectiva surge a possibilidade da sua mitigação, seja por ação direta sobre o agente econômico (via imposto) ou a partir do desenvolvimento de tecnologias que diminuam as emissões de gás carbônico e outros causadores do efeito estufa, de qualquer forma, conclui-se que há um caminho a ser seguido para frear os problemas.

Tendo isso em vista, fica o questionamento: quais são as consequências destas adversidades climáticas, tal qual a elevação de temperatura ou o aumento de precipitação, na economia contemporânea? Como antecipado, Kotz, Levermann e Wenz (2022), por meio de um painel de dados, mostram que há uma relação negativa e significativa entre chuvas torrenciais e a economia, principalmente nos países industrializados. Ainda com o modelo em painel, Barrios, Bertinelli e Strobl (2010) encontraram que o nível de chuvas tem sido determinante para o pobre crescimento econômico dos países da África Subsaariana. Seguindo a mesma metodologia de ambos, Brown, Meeks *et al* (2011) fornecem o resultado no qual o PIB *per capita* é positivamente sensível à precipitação, embora com sinal positivo pequeno, e não possui sensibilidade à temperatura.

Por outro lado, Dell, Jones e Olken (2008), Burke e Tanutama (2019) e Kalkuhl (2020) concluem, por meio de um painel de dados, que temperaturas elevadas reduzem o crescimento econômico nos países pobres, com pouco efeito nos mais ricos. Já por Dell, Jones e Olken (2009) se observa que, através de um modelo cross-country, há uma relação negativa entre temperatura e renda, mas com pouco efeito da precipitação. Em Kotz, Wentz *et al* (2021), também por meio do modelo de dados em painel, os autores mostram que a elevação da temperatura média anual tem sido fonte de impacto no crescimento macroeconômico.

Em relação à metodologia ARDL (*Autoregressive Distributed Lag*), utilizada neste estudo, Mohaddes, NG *et al* (2023) observam que para os Estados Unidos, tanto o desvio positivo, quanto o negativo, da temperatura ou precipitação média em relação ao “normal meteorológico” geram efeitos negativos no crescimento econômico. Por parte de Khoualfia e Bardi (2025) os resultados exibem um efeito positivo de longo prazo da precipitação no crescimento econômico europeu, enquanto a temperatura possui um efeito negativo.

Em virtude dos fatos mencionados, deve-se destacar um ponto importante: o nível de agregação das amostras nestes estudos. Em todos os trabalhos supracitados, as amostras em análise convergem para agregação de entes nacionais, em estudos em nível global ou então amostra constituída por entes estaduais (como é o caso de Mohaddes, NG *et al* (2023)), para

pesquisas em nível nacional. Contudo, ao pesquisar sobre questões como temperatura e precipitação, muitos efeitos oriundos da complexidade climática, em locais como no Brasil³⁹, podem ser erroneamente ignorados e tratados como insignificantes, vide Damania, Desbureaux e Zaveri (2020).

Assim sendo, o presente estudo se dedica a superar a escassez do referencial sobre a análise dos impactos de longo prazo do clima no crescimento econômico brasileiro. Com esse intuito foram utilizados dados de temperatura e precipitação, dos anos de 1950 a 2019, em conjunto com a metodologia observada em Mohaddes, NG *et al* (2023), uma estimação com ARDL para esta avaliação de longo prazo. Além disso, diferentemente dos estudos acima, este trabalho também se sobrepôs ao problema de agregação indicado por Damania, Desbureaux e Zaveri (2020) utilizando dados em nível municipal de precipitação e temperatura extraídos de Saldanha, Akbarinia *et al* (2024), por possuírem uma metodologia de zonas climáticas que melhoram a acurácia dos dados *vis-à-vis* outros dados brutos de satélites.

Como resultado dessa abordagem, foi possível perceber que a pluviometria possui efeitos heterogêneos no crescimento econômico de longo prazo, como por exemplo, resultados positivos para chuva abaixo da média histórica no PIB *per capita* do Nordeste e negativos no valor adicionado agropecuário. Para a região Sudeste, observou-se o contrário, ou seja, efeitos negativos para chuva abaixo do normal no PIB *per capita* e efeitos positivos no valor adicionado agropecuário. Já no caso da temperatura, encontrou-se um efeito praticamente homogêneo no país, isto é, temperaturas acima do normal histórico possuem efeito negativo no PIB *per capita* e no valor adicionado agropecuário de todas as regiões, com exceção da região Sul. Logo, é necessário que o poder público possua maior preocupação com políticas que amenizem os danos causados por fenômenos extremos proporcionados por mudanças climáticas em curso, tendo em vista que os impactos negativos relativos ao aumento da temperatura, via efeito estufa, podem gerar uma série de problemas no longo prazo, tanto de cunho econômico quanto de cunho social.

Por fim, além desta seção introdutória, o presente capítulo possui ainda uma segunda seção que apresenta o referencial teórico, as seções 3.3 traz as características climáticas das regiões e sub-regiões brasileiras, a seção 3.4 descreve os dados e a metodologia utilizada, a seção 3.5

³⁹ A complexidade climática brasileira poderá ser vista mais adiante, contudo, para fins de exemplificação, observa-se uma diferença de 1185.5 milímetros entre a precipitação média da região Norte e Nordeste, mesmo que latitudinalmente próximas; neve no Sul e calor extremo no Nordeste; anos com chuvas extremas no semiárido e anos com secas intermináveis, entre outros aspectos tratados na próxima seção.

apresenta os resultados, a seção 3.6 contém alguns detalhes sobre temperatura e, pôr fim, a seção 3.7 fecha com algumas considerações finais.

3.2. CLIMA E CRESCIMENTO

Como explicitado na seção anterior, as mudanças climáticas podem levar a diversos efeitos perniciosos ao longo do tempo. No caso da civilização moderna, embora ainda não exista um horizonte de análise no qual a total extinção humana seja tratada, assim como nas sociedades anteriores, existem implicações que precisam ser controladas ou levarão a danos irreversíveis e extremamente prejudiciais.

Em alguns casos é possível observar que a conjunção da variabilidade extrema da temperatura e da precipitação (ambas em relação ao normal meteorológico histórico) podem acarretar impactos negativos ao crescimento do PIB ou PIB *per capita* (KAHN, MOHADDES, *et al.*, 2021; MOHADDES, NG, *et al.*, 2023). Por outro lado, as precipitações excessivas (ou torrenciais) isoladas, resultantes do aquecimento global (KOTZ, LANGE, *et al.*, 2024a), também tem um efeito negativo nas economias mundiais (países pobres e industrializados) (BROWN, MEEKS, *et al.*, 2013; KOTZ, LEVERMANN e WENZ, 2022).

Porém, essa suscetibilidade a eventos extremos não se restringe a pluviometria, uma parte do referencial pertinente mostra que os danos causados pelo aquecimento global são prevalentes, ao proporcionar uma queda significativa no PIB ou PIB per capita de 12% a 8.5 p.p., respectivamente, dado o aumento de 1° C (NORDHAUS, 2006; DELL, JONES e OLKEN, 2009; KOTZ, WENZ, *et al.*, 2021; BILAL e KÄNZIG, 2024).

A partir dessas observações, já se pode depreender o tamanho do atraso econômico e retrocesso que as economias nacionais podem sofrer no longo prazo. Contudo, o mais crítico nessa situação ocorre ao observar uma certa heterogeneidade na absorção desses danos em relação ao nível de riqueza dos países, ou seja, com a elevação das temperaturas há redução do crescimento econômico nos países pobres maior que se comparado às nações mais ricas (DELL, JONES e OLKEN, 2012; NEWELL, PREST e SEXTON, 2021).

Este é o caso analisado por Meyghani, Mashhadi e Salehnia (2023) ao observarem que os aumentos da temperatura e da precipitação estão associados à queda no crescimento econômico dos países no Oriente Médio e Norte da África. Seguindo a mesma percepção, Baarsch, Granadillos *et al* (2020) estimaram que o clima vai induzir uma perda no crescimento econômico dos países africanos, podendo refletir a escassez de precipitação (BARRIOS,

BERTINELLI e STROBL, 2010; BROWN, MEEKS, *et al.*, 2011) ou a elevação térmica (ALAGIDEDE, ADU e FRIMPONG, 2016).

Indo além dos países africanos, Burke e Tanutama (2019) mostram que as mudanças climáticas afetam desproporcionalmente os países e regiões mais pobres observando-se a exposição à temperatura. Para fins de comparação, os mesmos autores estimam que os países na região tropical se tornaram 5% mais pobres que na ausência do aquecimento global.

Em suma, mesmo que pareça contraintuitivo, confirma-se então que em áreas naturalmente mais quentes, o aquecimento global impacta negativamente a economia. Aliás, ressalta-se que em áreas tropicais, assim como vistas neste presente trabalho, há efeitos negativos de aumento na temperatura mundial maiores que em relação aos demais países (STERN, 2006; KALKUHL, 2020; GUO, KUBLI e SANER, 2021; KOTZ, LEVERMANN e WENZ, 2024b).

O mais intrigante é que, sendo estas áreas mais pobres (SACHS, 2001) e as que menos produzem emissões que amplificam o efeito estufa, são as mais fortemente impactadas pelas mudanças climáticas (Forum Econômico Mundial, 2023). Ou seja, existe um desequilíbrio nos custos sociais, mais inclinado aos países pobres, o que torna necessário a construção de uma cooperação global forte para a mitigação dos danos climáticos, com forte participação dos países desenvolvidos. Sem essa cooperação também haverá problemas para os países ricos, mas as perdas serão ainda maiores nas regiões tropicais (CAI e BROCK, 2023).

Além disso, os impactos globais das mudanças climáticas também podem ser vistos sob um prisma mais geral, comparados à perda de bem-estar. Nesse caso, também há o agravante do prejuízo ser substancialmente maior nos países mais pobres (TOL, 2009; CAI e BROCK, 2023).

Dentre os canais propagadores dessa perda podem estar diversos fatores, contudo destaca-se que as mudanças climáticas intensificam a competição sobre a terra e água, afeta a produção de alimentos, aumenta a pobreza e desigualdades, aumenta os conflitos violentos e amplifica os riscos para mulheres adultas e jovens (ONU, 2024; FORUM ECONÔMICO MUNDIAL, 2023). Em parte, este é o resultado da restrição de crescimento econômico causada pela escassez de água e a quantidade de recursos hídricos⁴⁰ (EL KHANJI e HUDSON, 2016), com destaque para o impacto na agricultura (BROWN, MEEKS, *et al.*, 2011). Por outro lado, além das consequências pluviométricas para o crescimento apresentadas anteriormente, deve-se levar em

⁴⁰ Vide o exemplo dos Maias na seção introdutória.

conta também os efeitos específicos das altas temperaturas na produtividade agrícola (ARAGÓN, OTEIZA e RUD, 2021).

Mesmo que haja sensibilidade à elevação térmica em diferentes setores da economia (DELL, JONES e OLKEN, 2008; ZHANG, DESCHENES, *et al.*, 2018), a agricultura merece destaque nesta análise não só por sua importância na produção de alimentos e respectivo crescimento econômico dos países em desenvolvimento, mas ao examinar suas estruturas sociais muitos impactos socioeconômicos que passam despercebidos, emergem. Isso decorre, principalmente, porque alguns dos mais importantes resultados da mudança climática não serão sentidos simplesmente entre as populações dos países mais pobres, mas em especial as inseridas na agricultura de subsistência, isto é, a agricultura familiar e pequenos fazendeiros (MORTON, 2007; HARVEY, SABORIO-RODRÍGUEZ, *et al.*, 2018).

Esse fato implica que as escalas das propriedades rurais nestes países tendem a apresentar diferentes níveis de absorções dos prejuízos climáticos. Enquanto as grandes fazendas podem se beneficiar de informação, políticas públicas, acesso a crédito e uma estrutura social mais forte, as pequenas propriedades de subsistência sofrem para conseguir alcançar níveis aceitáveis de adaptabilidade (HARVEY, SABORIO-RODRÍGUEZ, *et al.*, 2018; MUKHERJEE e FRANSEN, 2024). Por mais que isso não implique em consequências significativas para o crescimento econômico, a suscetibilidade maior das plantações familiares à mudança climática, gera graves problemas de cunho social. Primeiramente, estudos mostram que famílias em face de condições climáticas adversas (quentes e secas) são mais propensas a sofrer insegurança alimentar, ou seja, ansiedade alimentar ou indisponibilidade de acesso a quantidade desejada (ASARE-NUAMAH, 2021; WATTS, HUTTON, *et al.*, 2024). Em segundo lugar, ao permanecerem suscetíveis às condições tão adversas é compreensível imaginar uma onda migratória dessas localidades para centros urbanos com maiores oportunidades e proteção (GUERRA, 1981; AB'SÁBER, 1999; MYERS, 2002; FONTES, 2008; OJIMA e FUSCO, 2015)⁴¹. Nesse caso os problemas passariam a se tornar cada vez mais complexos, como o provável “esvaziamento” das zonas rurais mais prejudicadas e aumento das pressões sociais nas cidades (MOURA, 1987; AB'SÁBER, 1999, p. 32).

Sendo assim, a partir do referencial pertinente, é possível concluir que as mudanças climáticas têm a capacidade de impactar negativamente nos mais diversos espectros econômicos, seja no crescimento heterogêneo entre países ou nas problemáticas sociais

⁴¹ A obra *O Quinze*, de Raquel de Queiroz, retrata estas posições sob o contexto da seca de 1915.

intranacionais. Em ambos os casos, deve-se ter em mente que não é apenas o progresso econômico mundial que aparece sob risco com as mudanças no clima, mas o progresso social, por meio do aumento das desigualdades, também está em questão.

3.3. CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS

Devido à grande complexidade climática brasileira, algumas informações iniciais sobre as particularidades de algumas áreas são importantes para uma melhor compreensão de como as variações de temperatura e precipitação podem impactar diferentemente os entes federativos⁴².

De modo geral, a distribuição dos níveis térmicos no Brasil segue um padrão de médias anuais decrescentes na direção Norte-Sul, com 94% do território inserido nas zonas climáticas equatorial e tropical (55% e 39%, respectivamente) e os outros 6% correspondem às áreas meridionais (no Sul), com temperatura média mais amena e amplitudes mais acentuadas, como observado na Figura 2.

Ainda por essa figura, nota-se que a temperatura média anual no país é de 23° C, sendo que as médias mais elevadas estão compreendidas entre 26.1° C e 25.5° C⁴³, concentradas nas regiões Norte e Nordeste. Em ambas as regiões, esse é o resultado da atuação da Massa Equatorial Continental e Massa Equatorial Atlântica, o encontro dos ventos alísios (quentes) provenientes da ZCIT (Zona de Convergência Intertropical) e massas de ar tropicais. Outro motivo que pode elevar as temperaturas decorre da localização dessas regiões, isto é, em baixas latitudes (próximas à linha do Equador) o ângulo de incidência da radiação solar apresenta valores elevados no decorrer do ano.

Na parte que vai, aproximadamente, de 14° Sul até 24° Sul, no Trópico de Capricórnio (regiões ao sul da Bahia à região Sudeste, até o norte do Paraná), observa-se uma faixa de transição entre os climas quentes e os climas frios, na qual as temperaturas médias anuais são relativamente mais baixas devido, entre outros fatores, pela ação mais efetiva da Massa Polar Atlântica.

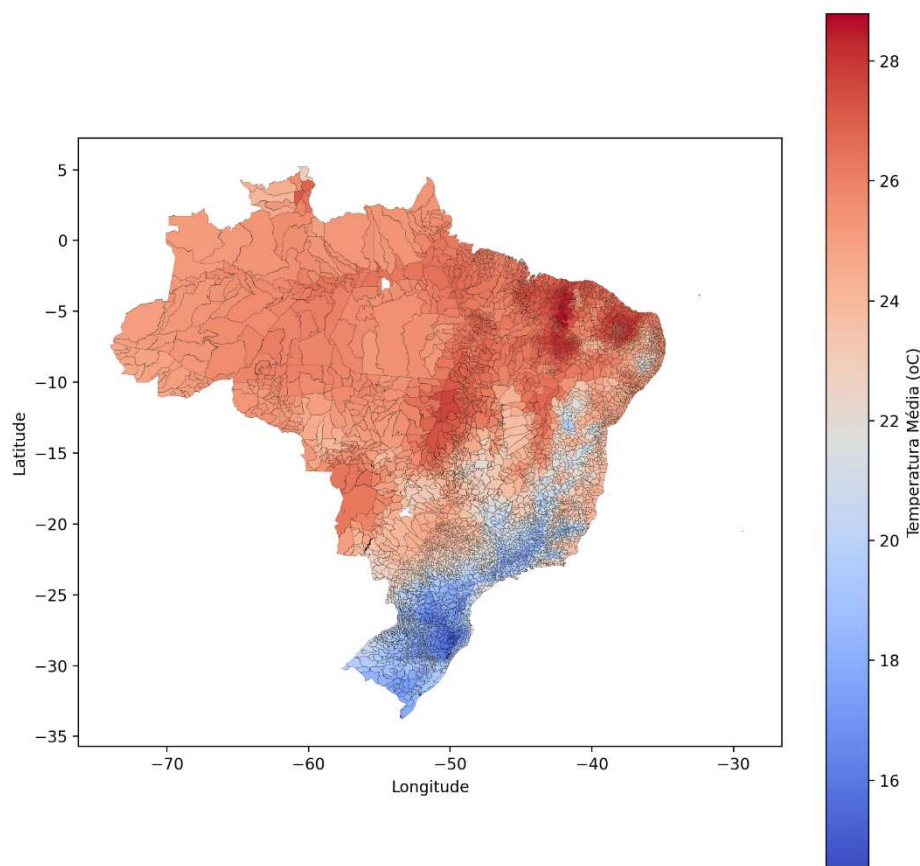
Já na área subtropical, que engloba quase toda Região Sul, se encontram as áreas mais frias do Brasil, com média anual de 19.3° C. Contudo, particularmente nas estações de verão, outono

⁴² Esta seção foi escrita a partir de Nimer (1989, p. 195-421) e Mendonça (2007, p. 139-182)

⁴³ Se referem a média anual, as amplitudes térmicas diárias e mensais podem alcançar valores bem maiores como ficará mais claro na seção 3.6.

e primavera, os índices térmicos se elevam. Isso decorre da atuação das Massas Tropical Atlântica, Tropical Continental e Equatorial Continental.

Figura 2 – Temperatura Média dos municípios brasileiros (1999-2019) (°C)⁴⁴

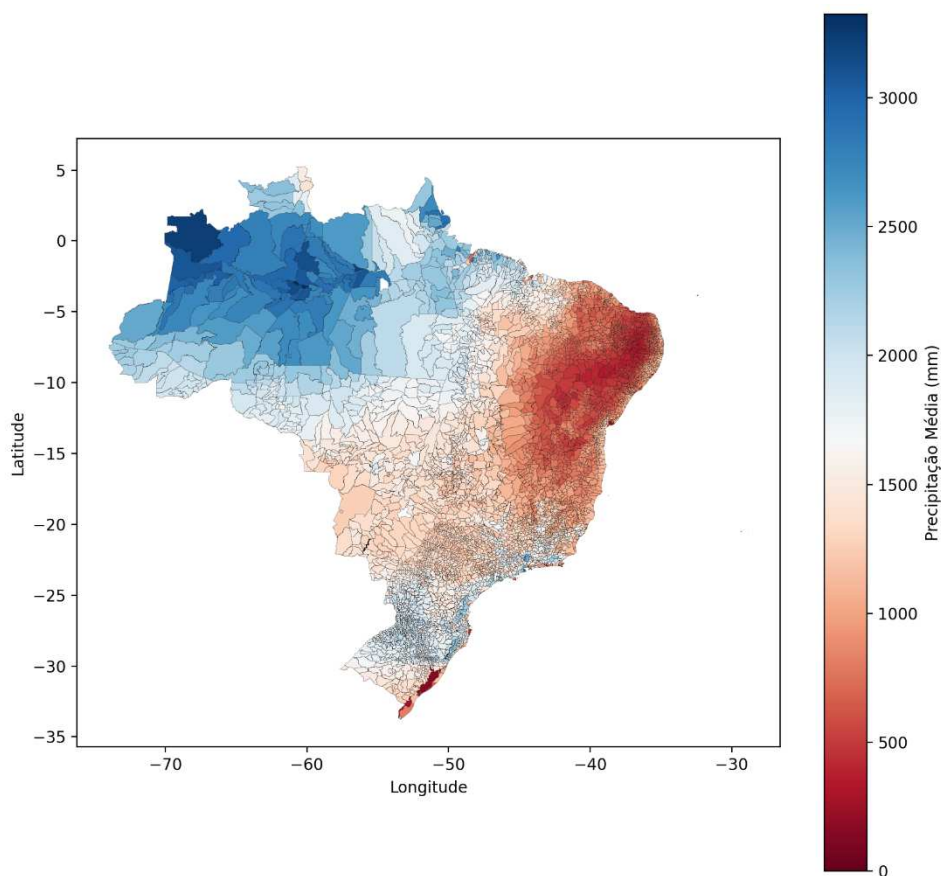


Fonte: Elaborado pelo autor.

Em relação à pluviometria, o Brasil também apresenta complexidade climática. Na região Norte com elevado nível de chuvas, chegando a uma média anual de 2026.5 milímetros, ou no Nordeste, em que se apresenta os menores níveis brasileiros com apenas 840.7 milímetros, por exemplo, há similaridades na temperatura, mas grandes diferenças na precipitação. Essa diferença deve-se principalmente à atuação conjunta das ZCIT, Massa Equatorial Continental e Massa Equatorial Atlântica na primeira região, enquanto no Nordeste as Massas Equatoriais Atlânticas, Continental, Tropical Atlântica e Polar Atlântica chegam com umidade insuficiente para produzir elevados níveis de chuvas, dentre outros fatores.

⁴⁴ Nas Figura 2 e Figura 2, latitude 0 = Linha do Equador

Figura 3 – Precipitação Total nos municípios brasileiros (1999-2019) (mm)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Além da região amazônica, todas as demais áreas contrapõem-se a este cenário de seca nordestino. O Centro-Oeste e Sudeste, por exemplo, mantêm um nível de pluviometria com média de 1440.7 e 1296.75 milímetros, respectivamente, e com grande importância da ZCAS (Zona de Convergência do Atlântico Sul) no comportamento de ambas.

Por último, a Região Sul apresenta índices pluviométricos médios de 1721.3 milímetros, seguindo a característica de clima úmido dessa área e como consequência da atuação da Frente Polar do Atlântico.

3.3.1. Região Norte

No que tange à Região Norte, em razão do seu relevo ser predominantemente plano (com exceção de algumas áreas ao sudoeste de Roraima), próximo ao nível do mar e com o Equador cortando-o de ponta a ponta, seu clima quente caracteristicamente mantém uma temperatura anual que varia de 24° C a 26° C. Contudo, por mais que haja elevadas temperaturas, a zona meridional da região pode apresentar médias inferiores a 12° C em decorrência de uma forte

massa de ar Polar de trajetória continental. Em especial nos estados de Rondônia, Acre e parte do Amazonas, essas massas excepcionalmente mais fortes podem provocar a chamada “friagem”, na qual além de reduzir duramente as temperaturas, é acompanhada de fortes chuvas. Contudo, deve-se lembrar que esta é a exceção, geralmente as temperaturas são elevadas.

No âmbito da umidade, a região Norte possui em tese 3 subdomínios climáticos⁴⁵: superúmido sem seca (área ocidental da Amazônia a Belém); superúmido com subseca; úmido com 1 a 2 meses de seca (maior parte do nordeste do Pará e do Amapá); úmido com 3 meses de seca (de Roraima ao sul do Pará, além de Rondônia e leste do Acre) e semiúmido com 4 a 5 meses de seca (leste de Roraima).

3.3.2. Região Nordeste

Já no caso do Nordeste, a sua extensa área (1.552.175,419 km²; IBGE, 2023), juntamente com seu relevo (constituído de amplas planícies, por vales baixos e planaltos que podem ter picos de 1200 metros) e uma combinação de sistemas de circulação atmosférica, fazem com que essa região possua uma das climatologias mais complexas do mundo (NIMER, 1989, p. 135), não por desvios térmicos, mas pluviométricos.

As temperaturas na região, as maiores encontradas no Brasil, podem ser divididas em duas categorias: quentes e subquentes⁴⁶. A primeira, no qual 95% do território se encontra, mantém temperatura média superior a 18° C, com temperaturas mais amenas, por exemplo, no Planalto da Borborema e Chapada Diamantina. Contudo, excluindo áreas mais elevadas, a zona ao norte do Nordeste constitui uma área mais quente, com média superior a 24° C, alcançando temperaturas máximas acima dos 40° C no interior (devido a continentalidade). Além disso, até por sua localização, 3° N e 18° S (bem próxima a Linha do Equador), a incidência solar é intensa durante o ano todo.

Nessa área, com temperaturas mais elevadas, encontram-se desde um clima superúmido (sem sequer 1 mês de seca), até um clima quase desértico com 11 meses secos. Entre essas categorias tem-se ainda clima úmido (de 1 a 3 meses de seca) e semiúmido (de 4 a 5 meses de seca). Sendo assim, reafirma-se que o maior problema dessa área não é a dispersão térmica, mas sim a pluviométrica.

⁴⁵ Para a classificação de mês seco foi utilizado o Critério de Gaussen e Bagnouls. (NIMER, 1989, p. 353)

⁴⁶ Para essa classificação, Nimer (1989) utilizou o critério de Köppen com a média de 18° C para o mês mais frio como limite entre os climas quentes (superior a 18° C) e subquente (abaixo de 18° C) (NIMER, 1989, p. 353).

Ademais, ainda que a área semiárida constitua quase 50% do território regional e seja marca da paisagem nordestina, não se pode excluir as áreas com níveis pluviométricos mais elevados, concentrados na faixa litorânea.

3.3.3. Região Centro-Oeste

O clima da Região Centro-Oeste do país, embora apresente variações térmicas, devido as mínimas diárias com poucas frequências, essas não chegam a impactar na diferenciação climática da região. Sendo assim, deve-se reconhecer a existência de duas variabilidades climáticas: quente e subquente.

O clima quente é a característica principal de praticamente todo território da região, com temperaturas próximas a 38° C em áreas como norte do Mato Grosso do Sul e Goiás e no Pantanal. Contudo, com raras exceções, sob ação do anticiclone polar, no inverno as mínimas podem descer bruscamente, alcançando 0° C nas áreas de chapada do Mato Grosso e Sul de Goiás, onde se encontra o clima mais próximo ao subquente.

Com cerca de 55% do território, o clima semiúmido é a característica mais marcante da pluviometria regional. Tal variação climática faz com que boa parte do Centro-Oeste tenha de 4 a 5 meses de seca no inverno e sua época chuvosa seja centrada no verão. Já os outros 45% são designados como clima-úmido, no qual apresenta apenas de 1 a 2 meses de seca.

3.3.4. Região Sudeste

Assim como o Nordeste, a Região Sudeste também é marcada por possuir grande variabilidade climática, entretanto, enquanto a primeira é marcada por ter a maior variabilidade levando em conta a distribuição de chuvas, a Região Sudeste detém uma grande diversificação de níveis térmicos. Isso não significa que exista uma homogeneidade no que se refere a umidade, pelo contrário, só é menos diversificada que o Nordeste (NIMER, 1989, p. 265).

Em relação à temperatura, o Sudeste é uma área de transição entre os climas quentes e úmidos ao norte e o subtropical úmido do sul. Dessa forma, nessas zonas temperadas, as estações têm a característica de serem mais bem definidas que nas regiões próximas da Linha do Equador, com estações chuvosas e outras mais secas, além de uma oposição ainda mais marcante entre a temperatura durante o verão e inverno. Entretanto, o clima predominante no território pode ser visto como subquente.

Quanto à pluviometria, o Sudeste é bem regado por chuvas, por mais que essas sejam desigualmente distribuídas no espaço e no ano. Enquanto a Serra do Mar paulista recebe, em média, mais de 4500 mm no ano, o médio curso do Jequitinhonha e do São Francisco, por exemplo, recebem 900 mm. Já durante o ano, devido a demarcada assimetria entre as estações descrita acima, as chuvas se concentram no verão, com o inverno de pouca precipitação. Desta forma, a Região quase em sua totalidade, possui em média pelo menos 1 mês seco, podendo alcançar 3 ou 6 meses em alguns locais específicos.

Além disso, um problema ainda pior sobre o regime de chuvas é a variabilidade pluviométrica no tempo, ou seja, a variação entre anos, o que nesse caso poderia acarretar significantes problemas econômicos.

3.3.5. Região Sul

Na Região Sul, posicionada na latitude média da zona intertropical, observa-se uma área mais homogenia climaticamente *vis-à-vis* as demais regiões (NIMER, 1989, p. 252). Com um clima predominantemente temperado, possui um comportamento térmico dividido em pelo menos 3 categorias: a de clima subsequente, no qual nenhum mês apresenta temperatura média inferior a 15° C, oscilando o mês mais frio entre 18° C e 15° C e no verão com média entre 26 e 24° C em janeiro. O clima mesotérmico brando, que domina 21.24% do Paraná, 13.53% de Santa Catarina e 46.93% do Rio Grande do Sul, possui um inverno muito sensível com pelo menos um mês com temperatura média inferior a 15° C e acima de 13° C (com significativas diferenciações no interior, seja no verão ou inverno). O clima mesotérmico médio, com maior predominância em Santa Catarina, apresenta pelo menos um mês com temperatura inferior a 10° C e se caracteriza por possuir inverno acentuado (médias das mínimas diárias mantêm-se abaixo de 6° C) e verão com pouco calor (com médias oscilando em torno de 20° C).

Em relação à pluviometria, a região possui 2 domínios climáticos: o clima úmido e clima superúmido. Esse último compreende a totalidade territorial dos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina e 67.62% do Paraná, onde normalmente não se verifica nem mesmo uma tendência à existência de uma estação seca, seja por totais pluviométricos elevados ou por uma grande frequência de dias de chuva em todos os meses. Mesmo nos climas úmidos (apenas 2.66% da região), a distribuição de chuvas apresenta apenas um curto período de 1 a 2 meses de “seca”. Juntamente com a região Norte, é a região com maior homogeneidade e unidade climática do país.

3.3.6. OUTRAS ÁREAS

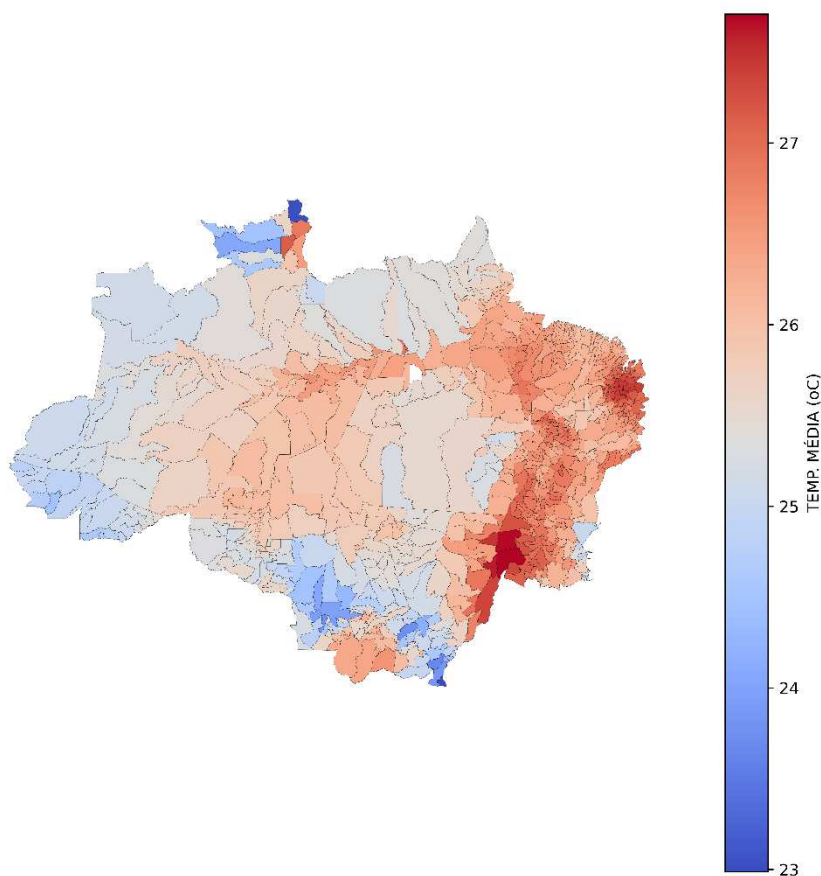
3.3.6.1. Amazônia Legal

De acordo com (IBGE, 2022), a Amazônia Legal só passou a ser referida dessa forma nas legislações mais recentes², até então o termo não era explícito nas leis que definiram esse território para fins de políticas públicas em décadas anteriores⁴⁷. Logo, tal área não passou por critérios de divisão idênticos aos das regiões citadas anteriormente, sendo que municípios originalmente definidos na Região Nordeste e Centro-Oeste estão localizados nesse território. O adjetivo “Legal” serve exatamente para restringir o entendimento de área no âmbito político-social ou mais especificamente a área de atuação da SUDAM (Superintendência de Desenvolvimento da Amazônia)⁴⁸ e, dessa forma, diferenciá-la do bioma amazônico, da bacia hidrográfica ou mesmo da Amazônia Internacional.

⁴⁷ A última na Lei Complementar nº 124, de 3 de janeiro de 2007.

⁴⁸ Delimitada em Art. 2º da Lei Complementar n. 124, de 03.01.2007.

Figura 4 – Temperatura média dos municípios na Amazônia Legal (1999-2019)



Fonte: Elaborado pelo autor.

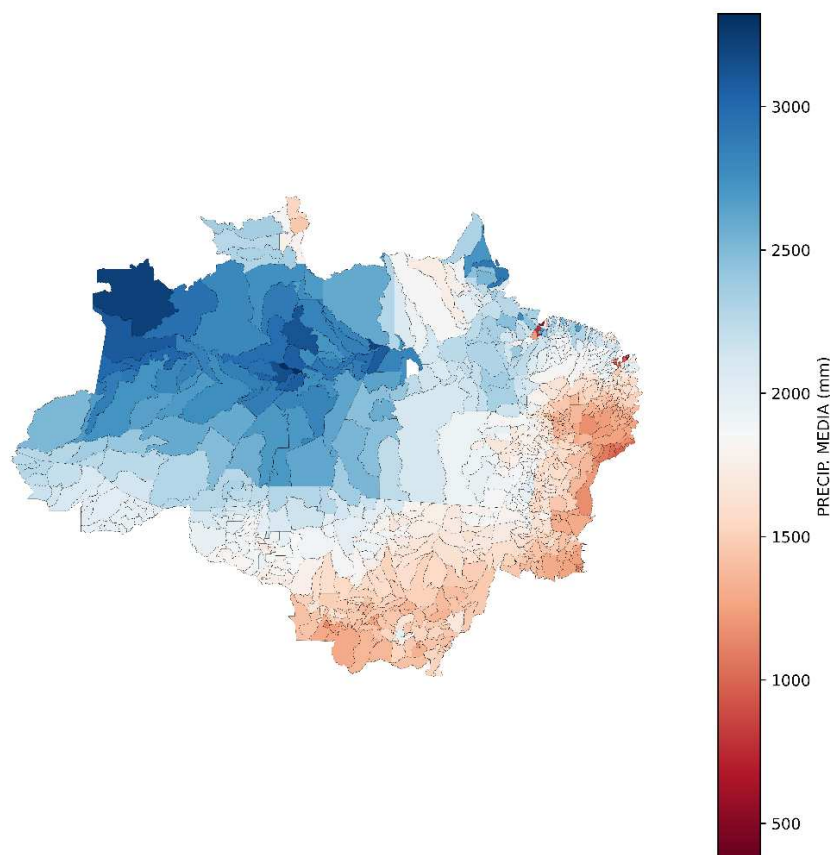
Os estados que constituem a Amazônia Legal são o Acre, Amapá, Amazonas, Mato Grosso, Rondônia, Roraima, Tocantins, Pará e do Maranhão na sua porção a oeste do Meridiano 44°, totalizando 772 municípios⁴⁹, o que corresponde a 58.93% do território nacional.

Além disso, sua existência, como já descrito acima, serve como finalidade para a SUDAM promover o desenvolvimento econômico, a redução de desigualdade perante o restante do país e a integração da base produtiva regional com o país e exterior. Logo, como o clima não é a razão prioritária para a caracterização da área é de se esperar alguma variabilidade. Como se pode observar na Figura 5, o maior nível pluviométrico está na zona Noroeste do território, abrangendo em quase sua totalidade o Amazonas, com uma precipitação de 2000 a 2500 milímetros em média. Já no quesito térmico, as maiores temperaturas se concentram mais a Leste, em que estão próximas a uma média de 26° C. Sendo assim, é possível observar um clima

⁴⁹ Alguns municípios maranhenses estão apenas parcialmente na Amazônia Legal.

mais próximo do apresentando em áreas quentes e úmidas, uma característica da Região Norte (onde se concentram o maior número de municípios da Amazônia Legal).

Figura 5 – Precipitação Média dos Municípios da Amazônia Legal (1999-2019)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Contudo, mesmo que as variáveis climáticas não sejam os parâmetros prioritários para essa subdivisão territorial, devido às recorrentes crises ambientais na Amazônia e a ambição desenvolvimentista da SUDAM, se faz necessário uma análise econômica à parte para essa área.

3.3.6.2. Semiárido

Primeiramente é necessário observar que pelo pensamento popular o semiárido está relacionado com o termo seca, contudo, por mais que não esteja errado, deve-se saber que, estritamente falando, existem conceitos diferentes. Como coloca Wilhite, Svoboda e Hayes (2007) e Cook (2019) as secas representam um desvio temporário relativo a alguma *baseline* particular em cada território, sendo assim, uma seca no Nordeste não vai se traduzir no mesmo déficit de chuvas que em uma região mais úmida como o Norte ou Sudeste (também ambientes

propícios a eventuais secas). Enquanto isso a aridez é o estado permanente do clima tipicamente associado com o baixo nível de precipitação.

Esclarecido isso, o semiárido brasileiro é constituído por uma área⁵⁰ que compreende 1477 municípios, localizado em todos os entes do Nordeste e alguns municípios de Minas Gerais e Espírito Santo. Para a construção de tal território partiu-se de alguns critérios técnicos, no qual, pelo menos uma precisa ser atendido, sendo eles: i) índice de Aridez de Thornthwaite inferior ou igual a 0.5; ii) Precipitação pluviométrica média anual igual ou inferior a 800 mm e; iii) Percentual Diário de Déficit Hídrico igual ou superior a 60%, considerando todos os dias do ano.⁵¹

Suas características principais, são chuvas predominantemente convectivas⁵² e orográficas, concentradas em um único período (3 a 5 meses) com distribuição muito irregular, umidade relativa baixa e evaporação elevada (CARVALHO, 1973, p. 21). Além disso, assim como no Nordeste em geral, há insolação forte e elevadas temperaturas durante todo ano, com média anual de 25,6° C em vez dos 25,4° C⁵³ nos demais municípios nordestinos fora do semiárido; baixo nível pluviométrico, 690 milímetros contra 1189 milímetros do restante da região⁵⁴. A partir de ambas as figuras se percebe que há áreas muito quentes e outras comparativamente mais amenas, até em outros municípios fora do semiárido, todavia quanto a pluviometria observamos uma homogeneidade alarmante de escassez nesse território. Ocorre que a precipitação é muito concentrada, com a peculiaridade de quanto menos dias chuvosos há, mais fracas são as chuvas. Sendo que o mais comum é a combinação das duas anormalidades: redução da precipitação média a 400 ou 500 mm, com concentração em poucos aguaceiros (GTDN, 1959, p. 65), ou seja, irregularidade pluviométrica entre anos e territorialmente (má distribuição espacial) (GUERRA, 1981, p. 21).

⁵⁰ Atualizada partir de nova delimitação criada em 2021 a partir da proposição n. 151/2021.

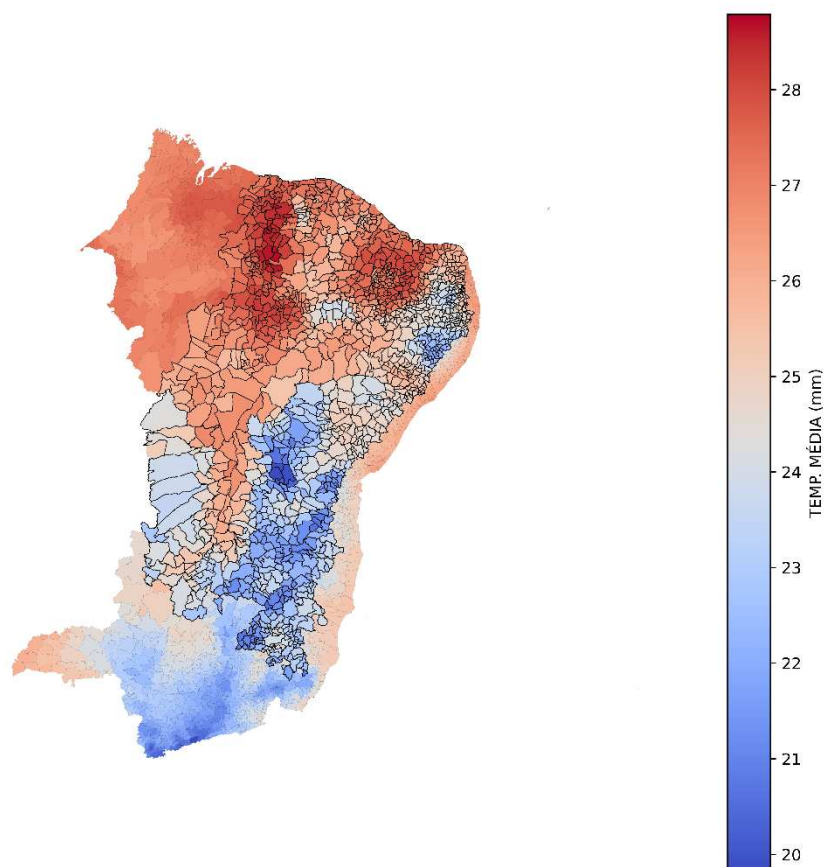
⁵¹ Essas medidas refletem a particularidade encontrada no semiárido brasileiro e tem como resultado uma análise de dados dessa região. Como contraponto alguns autores, como Cook (2019), índice que os semiáridos são locais com chuvas médias anuais entre 250 a 600 milímetros.

⁵² Logo, por mais que haja seca, podem ocorrer precipitações torrenciais pontuais.

⁵³ A temperatura média de todos os municípios brasileiros fora do semiárido é de 22.22° C.

⁵⁴ A pluviometria média de todos os municípios brasileiros fora do semiárido foi de 1523 milímetros contra 724 milímetros do semiárido. Nesse caso um pouco mais elevado devido aos municípios pertencentes a Minas Gerais e Espírito Santo.

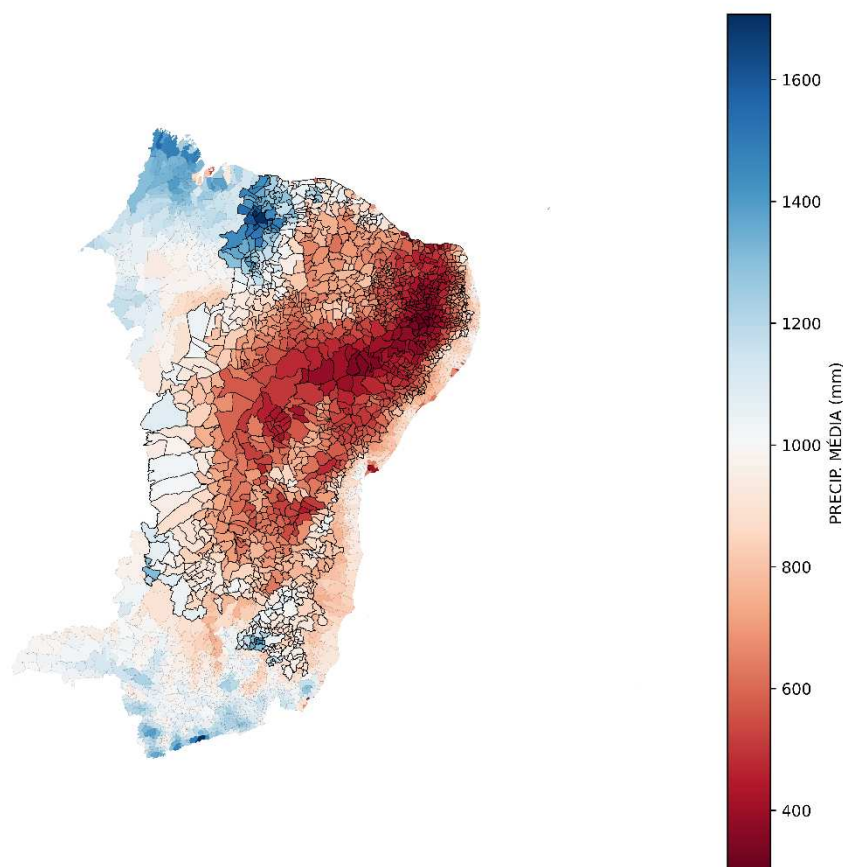
Figura 6 – Temperatura Média dos Municípios no semiárido em comparação com o Nordeste (1999 a 2019) (°C)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ademais, essa é uma realidade que sempre esteve presente no semiárido, tanto que a primeira grande seca registrada, por Fernão Cardim, ocorreu em 1583 (na Bahia e principalmente em Pernambuco). Felipe Guerra cita ainda que outro jesuíta, Padre Serafim Leite, fez referência a uma seca na Bahia em 1559 (GUERRA, 1981, p. 24).

Figura 7 – Precipitação Média dos Municípios no semiárido em comparação com o Nordeste (1999 a 2019) (mm)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Claro que em outras podem ocorrer secas, entretanto, a gravidade desse fenômeno no semiárido juntamente com a sua organização econômico-social, faz com que seja de suma importância o aprofundamento no seu estudo. Por exemplo, ao contrário da faixa úmida, a região semiárida dedicou-se desde o início, a uma economia agrícola principalmente de sequeiro e de subsistência⁵⁵ (GTDN, 1959, p. 62), sendo que em uma região onde parte da população vive da pequena agricultura, a falta de chuvas suficientes para as colheitas gera choques e desorganiza a economia e a própria vida da sociedade (GUERRA, 1981, p. 21).

⁵⁵ Sendo independente de outros fatores para o crescimento, esta economia de subsistência foi se interiorizando à medida que a população aumentava. (GTDN, 1959, p. 62)

3.4. DADOS E METODOLOGIA

3.4.1. Amostra

Tendo como recorte espacial os municípios brasileiros, foram coletados dados sobre temperatura e pluviometria para os anos de 1950 a 2019 provenientes de Saldanha, Akbarinia *et al* (2024)⁵⁶. Já os dados sobre população residente, PIB e valores adicionados são oriundos do IBGE, estes últimos com valores reais de 2010 calculados a partir do deflacionamento com o deflator implícito do PIB, obtido no IPEDATA⁵⁷. Vale destacar que apenas municípios com a série completa para estas variáveis foram utilizados, totalizando uma amostra de 5178 entes municipais brasileiros.

Além disso, como já antecipado nas subseções 3.3.6.1 e 3.3.6.2, a construção da amostra nas áreas da Amazônia Legal e do Semiárido seguiram as respectivas legislações vigentes. No último caso, devido a existência de algumas resoluções anteriores, preferiu-se utilizar como base a Proposição n. 151/2021 (mais atual), pois comportaria diferenciações presentes na amostra até 2019 que não seriam abarcadas pela Resolução CONDEL/SUDENE n. 107, de 27 de julho de 2017.

A Tabela 1 nos mostra um perfil médio dos estados brasileiros a partir dos dados municipais, no qual podemos ver que dos dez estados mais quentes, cinco estão localizados no Nordeste (sendo o Piauí, em média, o mais quente do Brasil) e cinco no Norte, convergindo com nossa análise nas seções anteriores e presente na Figura 2. Além disso, os estados do Piauí e Maranhão, os mais quentes do Brasil, possuem também o menor PIB per capita médio entre todos os entes federativos estudados⁵⁸, apresentando um coeficiente de correlação de -0.7 entre ambas as variáveis.

⁵⁶ Tal trabalho utiliza uma metodologia de “zonas estatísticas”, na qual possibilita uma série temporal longa e diretamente compatível com os limites administrativos dos municípios, ou seja, gera mais precisão do que o formato *gridded* isolado, amplamente utilizado. Neste último caso os limites municipais não ficam bem ajustados, gerando um “ruído” nos dados de municípios vizinhos e/ou vice-versa. Mais detalhes Saldanha, Akbarinia *et al* (2024, p. 2-3).

⁵⁷ Com dados oriundos do IBGE e do Sistema de Contas Nacionais

⁵⁸ Assim como no *Ranking* de estados mais quentes, o *Ranking* dos entes com menor PIB per capita também é dominado pelos estados no Norte e Nordeste.

Tabela 1 – Valores médios da amostra agrupado por estado (1999-2019) (continua)

UF	PIB (R\$ mil)(R\$ 2010)	Valor Adicionado Agropecuário (R\$ mil)(R\$ 2010)	Valor Adicionado Industrial (R\$ mil)(R\$ 2010)	Valor Adicionado Serviços (R\$ mil)(R\$ 2010)	PIB per capita (R\$ 2010)	Temperatura (graus Celsius)	Precipitação (milímetros)	Nº de municípios
AC	336.255.114	31881,11	32331,06	125806,2	7981,93	24,76	1989,57	22
AM	1.100.615.606	38361,22	375275,7	342869,8	6034,5	25,53	2684,31	46
AP	624.098.402	11413,77	63504,23	243246,4	10591,45	25,48	1997,73	12
PA	651.958.497	60477,9	183897,9	232977,5	8206,96	26,05	2075,54	104
RO	413.119.947	48344,19	67033,33	144910,7	10869,15	25,24	1918,6	50
RR	1.534.530.403	17956,11	175051,2	593770,6	11708,66	25,53	1986,45	3
TO	113.421.298	13594,78	16704,3	41402,47	8981,2	26,45	1669,07	130
AL	270.179.468	32211,55	45416,27	104209	6028,71	24,76	740,63	92
BA	343.137.531	25542,68	70646,03	143672,4	6358,41	23,65	776,54	398
CE	394.346.543	20910,02	71243,14	173761,7	5129,67	26,27	868,55	183
MA	280.757.783	22682,83	46596,2	121531,9	4612,77	26,65	1514,05	129
PB	146.758.019	6729,79	23296,23	57947,37	5285,27	25,4	602,93	209
PE	488.090.533	19719,46	86781,89	210735,6	6036,88	24,17	675,7	181
PI	107.977.849	7605,77	13760,81	44219,63	4490,63	27,11	1053,38	185
RN	215.020.705	7140,07	44313,62	85919,88	6824,56	26,37	607,06	146

Tabela 1 – Valores médios da amostra agrupado por estado (1999-2019) (conclusão)

UF	PIB (R\$ mil)(R\$ 2010)	Valor Adicionado Agropecuário (R\$ mil)(R\$ 2010)	Valor Adicionado Industrial (R\$ mil)(R\$ 2010)	Valor Adicionado Serviços (R\$ mil)(R\$ 2010)	PIB per capita (R\$ 2010)	Temperatura (graus Celsius)	Precipitação (milímetros)	Nº de municípios
SE	306.485.299	16045,61	74419,65	112530,9	9285,19	24,95	750,31	75
GO	397.642.487	40578,91	87730,79	167301,4	14549,3	23,91	1468,77	240
MS	581.913.263	96624,15	104627,2	213668,3	18908,81	23,51	1488,93	76
MT	447.318.742	86814,85	67252,43	175304,6	18016,41	25,13	1707,96	123
ES	963.467.926	35880,95	277615,1	353986,6	16648,14	21,88	1277,2	76
MG	374.162.204	20926,26	96471,26	156756,1	10551,45	21	1341,81	833
RJ	4.868.103.801	20201,91	1143489	2182472	24852,06	21,59	1502,22	83
SP	1.834.966.301	32521,87	389498,5	962474,7	18392	21,62	1436,81	634
PR	546.358.329	45366,77	130674,2	237979	15336,65	20,29	1616,5	395
RS	483.974.062	37094,21	107340,7	215741,4	17783,53	18,42	1792,26	464
SC	482.202.130	29662,49	127683,9	200442,3	18102,17	18,16	1774,1	289

Fonte: Elaborado pelos autores.

Tendo em vista a seção anterior, não é surpreendente que a região Nordeste também apresente os oito menores níveis pluviométricos em comparação às demais regiões, com uma média de apenas 825 milímetros (aproximadamente 560 milímetros abaixo da segunda região com menor precipitação média). Destaca-se ainda que os outros dois estados com menos chuvas, Minas Gerais e Espírito Santo, por mais que não estejam localizados no Nordeste, apresentam municípios pertencentes ao semiárido⁵⁹.

3.4.2. Metodologia

Para analisar os efeitos de longo prazo das variáveis climáticas no PIB per capita e Valor Adicionado Agropecuário foi utilizado para este trabalho o modelo de crescimento com variáveis climáticas presentes em Kahn, Mohaddes *et al* (2021) e Mohaddes, Ng *et al* (2023), estimados a partir de um modelo em painel ARDL usando o estimador de half-panel Jackknife com efeitos fixos (HPJ-FE) de Chudik, Pesaran e Yang (2018) e utilizado por Mohaddes, Ng *et al* (2023):

$$\Delta y_{i,t} = a_i + \sum_{l=1}^p \varphi_l \Delta y_{i,t-l} + \sum_{l=0}^p \beta'_l \Delta \tilde{x}_{i,t-l} + \epsilon_{i,t}, \quad (6)$$

onde $y_{i,t}$ é o crescimento do log do PIB real per capita na região ou estado i ; $\tilde{x}_{it}(m) = [\tilde{T}_{it}(m)^+, \tilde{T}_{it}(m)^-, \tilde{P}_{it}(m)^+, \tilde{P}_{it}(m)^-]'$, $\tilde{T}_{it}(m) = [T_{it} - T_{i,t-1}^*(m)]$ e $\tilde{P}_{it}(m) = [P_{it} - P_{i,t-1}^*(m)]$ são as medidas de temperatura e precipitação relativa a suas normais históricas, T_{it} e P_{it} são a média anual de temperatura e precipitação da região ou estado i no ano t , respectivamente, e $T_{i,t-1}^*(m) = \dots$ e $P_{i,t-1}^*(m) = \dots$ são as normais históricas da temperatura e precipitação da região ou estado i sobre os m precedentes em cada t . Neste caso m seria o tamanho do período utilizado para o cálculo dos normais climáticas que, assim como tipicamente utilizado, serão médias móveis com 30 anos⁶⁰ (ARGUEZ, DURRE, *et al.*, 2012; VOSE, APPLEQUIST, *et al.*, 2014; WMO, 2024; NOAA, 2024). As médias dos efeitos de longo-prazo, θ_i , são calculadas de estimativas em OLS dos coeficientes de curto-prazo na equação (6): $\theta = \phi^{-1} \sum_{l=0}^p \beta_l$, onde $\phi = 1 - \sum_{l=1}^p \varphi_l$.

Além disso, uma vez que a temperatura pode apresentar tendência, optou-se, assim como Mohaddes, Ng *et al* (2023) e Kahn, Mohaddes *et al* (2021), por especificar as regressões de

⁵⁹ Ver subseção 3.3.6.2.

⁶⁰ O período de 30 anos é padrão na construção dos normais climáticos no World Meteorological Organization (WMO) e National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).

crescimento ARDL em forma de desvios, ao invés de variáveis climáticas em nível ou ao quadrado.

Outro ponto que merece destaque são as condições para a utilização do modelo ARDL presente neste trabalho. Assim como Pesaran e Smith (1995), Pesaran (1997) e Pesaran e Shin (1999) já enfatizaram, a abordagem ARDL tradicional pode ser utilizada para estimações de longo prazo desde que as variáveis em análise sejam $I(0)$ ou $I(1)$ ⁶¹. Contudo, para validar essa técnica Chudik, Mohaddes *et al* (2017) e Chudik, Mohaddes *et al* (2016) afirmam ser necessário que o modelo tenha um número suficiente de lags para os resíduos não apresentarem correlação serial. Como Chudik, Mohaddes *et al.* (2017, p. 21) afirmam, um número máximo de lags igual a 3 pode ser suficiente, assim, neste trabalho procurou-se, como Mohaddes, Ng *et al* (2023) e Kah, Mohaddes *et al* (2021), trabalhar um pouco acima desse limite para garantir que os regressores fossem fracamente exógenos, logo optou-se por um lag igual a 4 para todas as variáveis. Como o foco primário da análise é na relação de longo prazo e não nas dinâmicas específicas das variáveis climáticas, a utilização de apenas um tamanho de lag não prejudica os resultados para os fins desejados neste trabalho.

Ademais, para a estimação da equação 6, priorizou-se seguir o referencial de crescimento econômico com impactos climáticos ao escolher o PIB *per capita* e Valor Adicionado Agropecuário como variáveis independentes⁶².

3.5. RESULTADOS

3.5.1. Resultados para Municípios Agrupados por Região

Para capturar possíveis heterogeneidades, os resultados foram obtidos para os municípios agrupados para cada região brasileira e, depois, para municípios agrupados por estado⁶³. A partir da Tabela 2 destacam-se os efeitos significantes de $\tilde{T}_{it}^+$ e $\tilde{T}_{it}^-$ ⁶⁴ em relação à média histórica tanto do PIB per capita, quanto do Valor Adicionado Agropecuário para todas as regiões do

⁶¹ A partir dos testes LLC, Harris-Tzavalis, Breitung, Lm-Pesaran-Shin e Fisher (no software Stata 17/MP), confirmou-se que todas as variáveis em estudo (precipitação, temperatura, PIB per capita e Valor Adicionado Agropecuário) são estacionárias.

⁶² (GALLUP, SACHS e MELLINGER, 1999; BLOOM, CANNING e SEVILLA, 2003; BARRIOS, BERTINELLI e STROBL, 2010; BROWN, MEEKS, *et al.*, 2011; BROWN, MEEKS, *et al.*, 2013; DAMANIA, DESBUREAUX e ZAVERI, 2020; KOTZ, LEVERMANN e WENZ, 2022; NG e ZHAO, 2011; KAHN, MOHADDES, *et al.*, 2021), entre outros.

⁶³ Para os resultados por estado consultar o apêndice.

⁶⁴ Desvios positivos e negativos em relação à média histórica.

país. Primeiramente, observa-se que as temperaturas acima da média histórica impactam negativamente o PIB *per capita* de quase todas as regiões brasileiras, com exceção apenas da Região Sul. Assim como observado nas as conclusões de Dell, Jones e Olken (2008), Dell, Jones e Olken (2009), Burke e Tanutama (2019), Kalkuhl (2020) e Kotz, Wentz *et al* (2021), no qual a elevação de temperatura tem impacto negativo no crescimento econômico, este resultado liga um sinal de alerta para a economia brasileira. Tendo em vista que o Aquecimento Global tornará cada vez mais frequentes as ondas de calor, o crescimento econômico das regiões brasileiras pode ser cada vez mais prejudicado no longo prazo, ou seja, surgimento de impactos negativos cada vez mais persistentes.

No caso do Nordeste, ainda que seja do cotidiano regional a grande absorção de radiação solar e altas temperaturas, com o aumento de 0,01° C acima da média histórica há uma queda anual de aproximadamente 0,06 pontos percentuais no crescimento do PIB per capita, sendo os principais estados afetados Paraíba (-0.430), Ceará (-0.397) e Maranhão (-0.285) (APÊNDICE Tabela 14⁶⁵). Como observado no referencial da seção 3.2, este resultado torna-se ainda mais alarmante para a região se levarmos em conta todo o contexto regional de pobreza e o que o aquecimento global pode causar nos aspectos socioeconômicos.

No Norte os desvios da temperatura acima da média reduzem o crescimento de longo prazo do PIB per capita no Amazonas (-0,813) e Tocantins (-0,161). No Sudeste, o aumento de 0,01° C resulta em uma queda de 0,241 pontos percentuais no crescimento do PIB per capita. Em particular, no caso do Rio de Janeiro (Tabela 14, no apêndice), um dos estados dessa região, esse decréscimo de longo prazo alcança aproximadamente 1,056 pontos percentuais. À vista disso, assim como no Nordeste, uma visão que correlaciona positivamente elevadas temperaturas com bem-estar (no setor turístico por exemplo) esconde prejuízos econômicos e sociais de longo prazo.

Seguindo a mesma tendência, o Centro-Oeste, focado principalmente em Goiás, também apresenta grande prejuízo de um impacto $\tilde{T}_{it}^+$ negativo no PIB *per capita*, realçando ainda mais a característica nacional de danos pela temperatura.

⁶⁵ Ao observar no apêndice, a Tabela 14 apresenta as estimações completas para o Piauí em relação ao valor adicionado agropecuário. No caso do PIB *per capita*, o algoritmo não mostrou convergência devido ao número máximo de iterações excedido.

Tabela 2 – Efeitos de Longo Prazo da Mudança Climática na Taxa de Crescimento dos Principais indicadores econômicos para o Brasil (1999-2019)

		PIB per capita	Valor Adicionado Agropecuário
Norte	$\hat{\theta}_{\tilde{T}_{it}^+}$	-0.06709**	-0.39521***
	$\hat{\theta}_{\tilde{T}_{it}^-}$	-0.15644	-1.12015***
	$\hat{\theta}_{\tilde{P}_{it}^+}$	-1.50E-05	0.000103
	$\hat{\theta}_{\tilde{P}_{it}^-}$	6.58E-05	0.00121***
Nordeste	$\hat{\theta}_{\tilde{T}_{it}^+}$	-0.05755***	-0.12905***
	$\hat{\theta}_{\tilde{T}_{it}^-}$	0.203275***	0.391975***
	$\hat{\theta}_{\tilde{P}_{it}^+}$	1.51E-05	-0.00037***
	$\hat{\theta}_{\tilde{P}_{it}^-}$	0.000111***	-0.00046***
Sudeste	$\hat{\theta}_{\tilde{T}_{it}^+}$	-0.2411***	-0.26989***
	$\hat{\theta}_{\tilde{T}_{it}^-}$	0.690813***	1.345643***
	$\hat{\theta}_{\tilde{P}_{it}^+}$	0.000281***	9.97E-05
	$\hat{\theta}_{\tilde{P}_{it}^-}$	-0.00026***	0.000195***
Sul	$\hat{\theta}_{\tilde{T}_{it}^+}$	0.139925***	0.657347***
	$\hat{\theta}_{\tilde{T}_{it}^-}$	0.341441***	0.634147***
	$\hat{\theta}_{\tilde{P}_{it}^+}$	-0.000062**	-0.00011***
	$\hat{\theta}_{\tilde{P}_{it}^-}$	-0.00028***	-0.00049***
Centro-Oeste	$\hat{\theta}_{\tilde{T}_{it}^+}$	-0.30801***	-0.45169***
	$\hat{\theta}_{\tilde{T}_{it}^-}$	0.045723	0.469334
	$\hat{\theta}_{\tilde{P}_{it}^+}$	0.000253***	0.000682***
	$\hat{\theta}_{\tilde{P}_{it}^-}$	0.000291***	0.001172***

*: significante a 10%; **: significante a 5%; ***: significante a 1%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Já os resultados para o Valor Adicionado Agropecuário mostram que, na região Norte (segunda coluna da Tabela 2 e Tabela 14, no apêndice), observa-se um efeito de $\tilde{T}_{it}^+$ maior do que o observado no PIB *per capita*, entretanto, ao contrário das demais regiões, os desvios negativos da temperatura também causam uma queda no crescimento do valor adicionado desse setor. Como já antecipado na seção 3.3.1, esta exceção tem origem no fenômeno chamado “friagem”, especialmente em Rondônia e Amazonas como confirmado na Tabela 14, no apêndice.

Para as demais regiões com efeitos significantes no termo $\tilde{T}_{it}^-$, temos que uma temperatura mais amena leva a um crescimento do Valor Adicionado Agropecuário. De acordo com Griffiths

(1976), isso pode decorrer do aumento na quantidade de matéria orgânica em uma planta média até aproximadamente 25° C e que alcança zero por volta dos 40° C.

No que se refere aos efeitos dos desvios pluviométricos, assim como observado em parte da literatura apresentada nas seções 3.1 e 3.2, os resultados apresentaram um nível maior de heterogeneidade se comparado aos desvios térmicos vistos acima. Na região Norte, apenas desvio da precipitação abaixo normal no valor adicionado agropecuário foi significativo e positivo, o que pode ser explicado como um benefício na agricultura de uma trégua na grande umidade regional.

Em relação à região Nordeste, um nível de chuvas menor que o normal histórico causa um decréscimo na agropecuária, em contraposição ao observado no PIB *per capita*. Nesse caso, pode ser deduzido que o setor agropecuário, na região mais seca do Brasil, é fortemente impactado pelo enfraquecimento da oferta hídrica. No que se refere às chuvas mais elevadas em relação ao normal meteorológico histórico, os efeitos são igualmente prejudiciais para a agricultura, de modo que altos níveis de pluviometria também podem acarretar em danos, como por exemplo proporcionar um aumento na erosão do solo (GUERRA, 1981, p. 21).

Em relação ao efeito da pluviometria abaixo do normal na região ser positivo no PIB *per capita* de longo prazo, pode ser compreendido primeiramente a partir da visão setorial, na qual setores da economia, propulsores de crescimento da região, não tenham uma relação negativa com a pluviometria no longo prazo, como o setor de serviços⁶⁶(que apresenta uma participação média de 39% no PIB regional) ou administração pública⁶⁷ (que possui uma participação média de 21.9% no PIB regional)⁶⁸. Já sob outra perspectiva, esse efeito da chuva pode ser entendido no contexto das políticas públicas, ou seja, políticas de convivência com a Seca ou de políticas assistencialistas (não específicas, como o Bolsa Família, ou específicas, como auxílios, renegociação de dívidas e seguros em épocas de secas) estão impactando de alguma forma nesta relação economia-clima. Todavia, destaca-se que os efeitos negativos da escassez pluviométrica nesta região ainda superam os efeitos positivos apresentados no PIB *per capita*, isto é, mesmo com crescimentos no longo prazo, a situação hídrica ainda possui um panorama alarmante.

Além disso, há dois pontos que tornam tais resultados importantes, como já antecipados no início dessa seção e no referencial teórico. Seja para o Norte ou principalmente para o Nordeste,

⁶⁶ Excluindo administração, defesa, saúde e educação públicas e seguridade social.

⁶⁷ É formado por administração, defesa, saúde e educação públicas e seguridade social.

⁶⁸ Em comparação a agropecuária possui uma participação média de 16% e o setor industrial possui uma participação média de 9% no PIB regional.

tendo em vista um modo de produção rural no âmbito familiar, com poucas mudanças estruturais e numa região onde a parte da população vive da pequena agricultura de subsistência, a irregularidade das chuvas tem o poder de abalar e desorganizar a economia (GUERRA, 1981, p. 21; GTDN, 1959, p. 63). Um outro destaque, as políticas hídricas para convivência com a seca realizadas de forma isolada de uma política ambiental mais ampla (que incluía o aquecimento térmico), podem não ser suficientes para reverter esse problema. Logo, ao deduzirmos que a temperatura acima da média tem um efeito negativo de longo prazo ainda maior na lavoura de subsistência (praticamente sem tecnologia e intensiva em trabalho) e na criação animal (MCMANUS, CANOZZI, *et al.*, 2012), é possível observar uma espécie de “armadilha da pobreza” por vias climáticas. Soma-se a isto políticas de reversão desse círculo vicioso limitadas aos programas assistencialistas, que podem ser necessárias, mas não suficientes para o crescimento econômico no longo prazo.

Em relação ao Sudeste, como pode ser analisado na Tabela 2, desvios negativos na precipitação promovem um efeito positivo no Valor Adicionado Agropecuário. Como as explicações definitivas sobre as causas destes efeitos não são o foco deste trabalho, é possível apresentar apenas algumas suposições dos motivos que levam a este resultado. Sendo assim, é um cenário provável que a região se beneficie do clima um pouco menos úmido, e, portanto, mais bem controlado, em conjunto com um solo de produtividade díspar em relação às demais regiões ou em combinação com a infraestrutura irrigada⁶⁹. Além disso, observa-se que a infraestrutura de irrigação na região, sob a perspectiva de menos chuva, pode funcionar como uma proteção maior para o setor agropecuário em relação aos problemas pluviométricos suscetíveis de acontecer, como é o caso de erosão do solo. Outro caso, que pode servir para outras áreas brasileiras, são as culturas mais comuns de cada localidade. No caso do Rio de Janeiro (Tabela 14, no apêndice), observa-se que a cana-de-açúcar é uma cultura característica do estado⁷⁰. Tal variedade pode ser beneficiada por um menor nível de precipitação no período de maturação dos colmos⁷¹, pois aumenta a concentração de açúcares (CARNEIRO, CASAROLI e SANTOS, 2015). A mesma situação pode ser vista em Alagoas, com a cana-de-açúcar sendo a cultura líder em quantidade produzida e valor (IBGE, 2023).

⁶⁹ Ao contrário da pluviometria, que gera oferta de água, mas pode ampliar erosão do solo pela chuva, a irrigação traz apenas a oferta de água, sem ser acompanhada por essa externalidade negativa. Ademais, O Sudeste brasileiro possui a maior estrutura de irrigação do Brasil, sendo 1.6 vezes maior que no Sul, 2.3 vezes maior que no Centro-Oeste, assim como no Nordeste, e 14 vezes maior que a estrutura do Norte. (CONAB, 2024). Ou seja, uma solução tecnológica para contrabalançar o efeito do clima.

⁷⁰ Maior cultura em quantidade produzida (IBGE, 2023b).

⁷¹ Mais popularmente são os talos da planta.

A Região Sul brasileira é a que apresenta as temperaturas mais amenas⁷². Os resultados da Tabela 2, mostram que o desvio negativo de temperatura possui um efeito positivo na região, contudo, diferentemente do restante do país o desvio positivo não afeta negativamente o PIB *per capita* ou o valor adicionado agropecuário como as demais áreas brasileiras, isto é, o aumento de 0,01° C da temperatura em relação a sua média histórica pode promover 0,1 p.p. de crescimento no PIB *per capita*. Uma possível explicação para este resultado pode estar relacionada com o clima mais ameno desta região. Como a característica climática do Sul brasileiro é de uma temperatura mais baixa, elevações na temperatura ainda deixarão o ambiente agradável. Já em relação à chuva, diferentemente de outras regiões, tanto para o PIB *per capita*, quanto para o valor adicionado agropecuário, há decrescimento no longo prazo devido às chuvas abaixo e acima do esperado. No primeiro caso possivelmente haja uma necessidade de irrigação acima do disponível no período mais seco, já no segundo caso, o decrescimento devido à pluviometria acima do esperado não está correlacionado apenas com os fatores supracitados, mas deve-se ter em mente também o histórico de enchentes na região. Isto mostra que aparentemente a região Sul está mais adaptada ou preparada para alterações na temperatura, mas as variações das chuvas, com destaque para os excessos, demandam maiores investimentos.

No Centro-Oeste, observa-se que, assim como no caso do Sudeste, os desvios da precipitação geram efeitos positivos. Há diversas explicações possíveis para esse efeito (que não serão abordadas neste trabalho) dentre elas: políticas de irrigação ou tecnologias correlacionadas, especificidades no solo, trabalho em biotecnologia para produção de sementes específicas para o clima da região, entre outras.

Todavia, assim como em outras regiões, temperaturas mais elevadas que o normal meteorológico histórico promove um efeito negativo no crescimento: a elevação de 0,01° C acima da média histórica gera um decrescimento de quase 0,5 pontos percentuais no valor adicionado agropecuário de longo prazo, com destaque para Goiás (redução de 1,4 pontos percentuais). Além disso, devido a importância agrícola do Mato Grosso para o país⁷³, deve-se destacar também que desvios térmicos negativos prejudicam o crescimento do valor adicionado agropecuário no longo prazo (uma redução de 3,7 pontos percentuais!). Portanto, tendo em vista a importância deste estado na política nacional de produção agropecuária, este é mais um

⁷² Como visto na seção 3.3.5.

⁷³ Líder no Valor Bruto da Produção Agropecuário em dezembro de 2019. (Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2019).

indicativo que o Brasil precisa se preocupar com as variações e possibilidades de eventos climáticos extremos, considerando os efeitos e particularidades de cada estado ou região.

3.5.2. Amazônia Legal e Semiárido

Em relação às “subáreas” da Amazônia Legal e do Semiárido brasileiro, poucas mudanças são observadas em relação às regiões nas quais estão incluídas. No primeiro caso destaca-se que a Amazônia Legal, diferentemente da Região Norte, apresenta um valor significativo e positivo para $\hat{\theta}_{\bar{p}_{it}^-}$, contudo muito pequeno. Já em relação ao Valor Adicionado da Agropecuária, o estimador associado a $\hat{\theta}_{\bar{p}_{it}^+}$ também se torna significativo e positivo, o que é plausível, tendo em que vista que agora há agregação de municípios do Centro-Oeste e Maranhão, relativamente mais secos que o Norte⁷⁴ e que se beneficiam de mais chuva.

No que se refere ao Semiárido, não houve nenhuma diferença quanto aos sinais ou a significância dos resultados em relação ao exposto pelo Nordeste. Contudo, vale ressaltar que a magnitude do coeficiente $\hat{\theta}_{\bar{p}_{it}^-}$ para o PIB *per capita* é ainda menor que o apresentado pela região (0,000081 p.p. e 0,0001 p.p. respectivamente). Por mais que não seja a finalidade deste trabalho, pode-se observar a diminuição desse impacto como uma consequência de um problema mais sério com a pluviometria se compararmos com toda a região (ver Figura 7). Nesse caso, o ambiente mais seco é de tal proporção que as políticas alocadas em outras áreas exibem um efeito menor. Outros casos, como um impacto de $\hat{\theta}_{\bar{r}_{it}^+}$ (no PIB per capita e valor adicionado agropecuário) e $\hat{\theta}_{\bar{p}_{it}^-}$ (no valor adicionado agropecuário) maiores em relação ao Nordeste confirmam a extensão do problema climático no Semiárido.

⁷⁴ Ver Figura 5.

Tabela 3 – Efeitos de Longo Prazo da Mudança Climática na Taxa de Crescimento dos Principais indicadores econômicos para a Amazônia Legal e Semiárido (1999-2019)

		PIB per capita	Valor Adicionado Agropecuário
Amazônia Legal	$\hat{\theta}_{\tilde{T}_{it}^+}$	-0.1381433***	-0.44428***
	$\hat{\theta}_{\tilde{T}_{it}^-}$	-0.1882602	-1.3763***
	$\hat{\theta}_{\tilde{P}_{it}^+}$	0.0000229	0.000231***
	$\hat{\theta}_{\tilde{P}_{it}^-}$	0.0001807***	0.000923***
Semiárido	$\hat{\theta}_{\tilde{T}_{it}^+}$	-0.0616078***	-0.18407***
	$\hat{\theta}_{\tilde{T}_{it}^-}$	0.2295213***	0.282095***
	$\hat{\theta}_{\tilde{P}_{it}^+}$	-0.0000503*	-0.00045***
	$\hat{\theta}_{\tilde{P}_{it}^-}$	0.0000808***	-0.00054***

*: significante a 10%; **: significante a 5%; ***: significante a 1%

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.6. TEMPERATURA

Tendo em vista os resultados apresentados na seção anterior e todo contexto de aquecimento global que passa o planeta, faz-se necessário detalhar alguns pontos sobre a temperatura.

Pode parecer que a magnitude do aumento de 0.01° C seja irrelevante para algum impacto significativo na sociedade. Contudo, é necessário observar que a série temporal deste trabalho é anual, ou seja, os dados são oriundos de uma média (seja temperatura diária ou mensal) dos municípios brasileiros. Isso significa que pequenas variações na média anual podem significar grandes mudanças térmicas diários ou mensais.

Para tornar mais didático é importante observar o seguinte exemplo: o município de São Paulo em 2019 tinha uma temperatura média de 25,78° C, entretanto imagine que, por algum motivo, o clima ameno do mês de julho tenha mudado e todos os dias deste mês os termômetros marcaram 40° C, ou seja, uma variação diária de aproximadamente 15° C⁷⁵! Mesmo com tamanho impacto diário a média anual de 2019, *ceteris paribus*, a nova média passa a ser aproximadamente 27,03° C, ou seja, uma variação de apenas 1,25° C!

Da mesma maneira, quando analisada a seção 3.3, pode ter causado certa estranheza valores de temperatura média anual menores que o consenso popular poderia indicar. Veja por exemplo o caso da região Nordeste, que apresentou uma temperatura média de aproximadamente 25,9°

⁷⁵ A média para o mês de julho de 2019 em São Paulo foi de 25,3° C

C em 2019. A partir do conhecimento básico da região poderia se considerar este nível térmico como ameno ou confortável, muito diferente do imaginado. Todavia, deve-se ter em mente que todos esses exemplos não possuem menção direta sobre a amplitude térmica (a diferença entre a maior e a menor temperatura registrada em determinado período de tempo). No caso específico do Nordeste, por exemplo, a média das temperaturas máximas foi de 34,3° C e a média das mínimas de 19,6° C, logo num mesmo ano houve períodos e municípios com temperaturas elevadas (consonante com a realidade conhecida da região), mas também houve temperaturas menores⁷⁶.

De forma geral, é possível estender os resultados acima a partir dos dados nacionais. Para isso realizou-se uma estimação de dados em painel com efeitos fixos da amplitude e média térmicas, assim como presente na equação 7,

$$\bar{x}_{i,t} = \alpha_i + \beta_0 + \beta_1 \text{amplitude}_{i,t} + e_{i,t} \quad (7)$$

onde $\bar{x}_{i,t}$ é a média da temperatura e $\text{amplitude}_{i,t}$ é a amplitude térmica na localidade i e tempo t , sendo i todos os municípios da amostra e $t = 1999, \dots, 2019$. A amplitude térmica nesse caso nada mais é que a diferença entre o mês mais quente e o mês menos quente no ano t ⁷⁷.

A Tabela 4 apresenta os resultados da eq(7). Percebe-se que o aumento de 1° C na amplitude térmica mensal resulta em um aumento da média da temperatura de apenas 0.03° C, ou seja, pequenas variações térmicas, presentes neste trabalho, podem representar variações maiores na amplitude térmica em períodos menos agregados (seja no mês ou dia por exemplo).

Tabela 4 – Relação da amplitude térmica e média da temperatura (1999-2019)

	Coefficiente
Amplitude térmica	0.0308993***

*: significativa a 10%; **:significante a 5%; ***: significativa a 1%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Além disso, estes resultados não são apenas efeitos restritos a este trabalho. Em Stern (2006, p. 57), o ex-economista-chefe do Banco Mundial mostra que pequenos aumentos permanentes na temperatura do planeta podem acarretar problemas graves, como por exemplo: apenas 1° C de aumento permanente na temperatura do planeta já propiciaria a morte de ao menos 300 mil pessoas a cada ano por doenças relacionadas com o clima (principalmente diarreia, malária e

⁷⁶ Regiões de serra por exemplo.

⁷⁷ Definição de amplitude térmica anual.

desnutrição), pelo menos 10% das espécies terrestres entrariam em risco de extinção e ocorreria 80% do branqueamento de recifes de coral⁷⁸; com 2° C, de 40 a 60 milhões de pessoas estariam expostas à malária na África, haveria um declínio vertiginoso nos rendimentos das colheitas em regiões tropicais e de 15% a 40% das espécies entrariam em risco de extinção; já com 4° C mais de 80 milhões de pessoas estariam expostas à malária na África e com 5° C o aumento do mar ameaçaria pequenas ilhas, áreas costeiras com litoral baixo (como a Flórida) e a maioria das cidades como Nova York, Londres e Tóquio.

Tendo em vista agora o que os resultados encontrados na seção anterior realmente podem representar, no âmbito mensal e sua real capacidade de impacto no cotidiano, deve-se refletir o quanto a temperatura cresceu no decorrer da série estudada neste trabalho. Para este fim, utilizou-se uma metodologia levando em conta a heterogeneidade dos municípios brasileiros com relação às mudanças na temperatura no decorrer do tempo, assim como em Mohaddes *et al* (2023, p. 4) e Kahn *et al* (2021, p. 39),

$$T_{it} = a_{T_i} + b_{T_i}t + v_{T_{it}} \text{ para } i = 1, 2, \dots, 5178 \quad (8)$$

onde T_{it} é a média ponderada da temperatura do estado i no ano t . O aumento médio anual da temperatura para o município i é dado por b_{T_i} . As Tabela 5 e Tabela 6, mostram os resultados da eq(8) para painéis de dados formados por municípios agrupados em regiões e por estado, respectivamente.

A partir desta tabela e comparando com os resultados encontrados por Mohaddes *et al* (2023) e Kahn *et al* (2021) depreende-se inicialmente que todas as regiões apresentaram um crescimento médio anual de temperatura acima da média americana, 0.026, e da média mundial, 0.018 por ano. Estes resultados reforçam o quanto a magnitude do aquecimento brasileiro não pode ser menosprezada.

⁷⁸ Por conseguinte, impactaria um ecossistema marítimo todo.

Tabela 5 – Estimativas do aumento médio anual da temperatura nas regiões (1999-2019)

Região	$\hat{b}_{T_i}$
Sudeste	0.046246
Norte	0.041624
Centro-Oeste	0.034748
Nordeste	0.030791
Sul	0.026853
Amazônia Legal	0.0417403
Semiárido	0.0354193

Nota: todos coeficientes são significantes a 1%.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Dentre os resultados apresentados na Tabela 5, destaca-se as regiões Sudeste, Norte e Centro-Oeste. Todas essas sobressaem-se seja pelo tamanho da fronteira agrícola e/ou desmatamento do seu respectivo bioma: Floresta Amazônica, Cerrado ou Pantanal e Mata Atlântica. Observando na Tabela 6, tem-se que os 3 primeiros estados, os quais possuem o maior aumento médio anual de temperatura, se destacam pela relevância no desmatamento nacional. De acordo com o SOS Mata Atlântica (2020), Piauí e Minas Gerais possuíam as três principais cidades desmatadoras da Mata Atlântica em 2019. O Amazonas por si só também é reconhecido por problemas com perda de bioma, como por exemplo as queimadas. Claro que tais explicações só são hipóteses ou uma parte da explicação para esses aumentos anuais na temperatura, outros argumentos como aumento de poluição, falta de infraestrutura para recolhimento de lixo, entre outras, também podem realçar quantas dificuldades precisam ser enfrentadas pelos *policy-makers*.

Tabela 6 – Estimativas do aumento médio anual da temperatura nos estados (1999-2019)
(continua)

UF	$\hat{b}_{T_i}$
AC	0.023864
AL	0.023608
AP	0.03242
AM	0.048736
BA	0.040707
CE	0.023324
ES	0.043514
GO	0.041755
MA	0.042648
MT	0.030057
MS	0.02021
MG	0.048864

Tabela 7 – Estimativas do aumento médio anual da temperatura nos estados (1999-2019)
(conclusão)

UF	$\hat{b}_{T_i}$
PA	0.04288
PB	0.01431
PR	0.031488
PE	0.018916
PI	0.058003
RJ	0.03726
RN	0.011445
RS	0.023245
RO	0.025651
RR	0.043733
SC	0.026311
SP	0.04431
SE	0.029934
TO	0.048054

Nota: todos coeficientes são significantes a 1%.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ademais, comparando crescimento da temperatura entre a região Nordeste e o Semiárido, encontra-se um aumento maior nessa última. Tendo em vista a realidade desta região, é necessário que políticas ambientais críveis sejam colocadas em práticas em detrimento de uma política invariável de oferta de água, mesmo que esta seja essencial para a sobrevivência da população, destaca-se aqui uma visão de ação em múltiplas frentes, ainda mais que tais políticas podem oferecer efeitos sinérgicos, ocasionando efeitos crescentes de escala para a sociedade⁷⁹.

3.7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

De modo geral, este segundo capítulo procurou adicionar à literatura econômica sobre impactos climáticos de longo prazo ao incorporar análises voltadas à realidade brasileira, ainda muito escassa. Além disso examinou como os desvios das variáveis climáticas em relação aos seus normais meteorológicos históricos impactam no crescimento de longo prazo. Em relação aos desvios pluviométricos foi encontrada uma heterogeneidade inter-regional do impacto no crescimento econômico, mas com efeitos muito pequenos. Porém, essa diferença com outros trabalhos nessa mesma área, como destacado por Damania *et al* (2020), podem ocorrer devido

⁷⁹ Como por exemplo o aumento da cobertura vegetal para evitar corrosão e aumento da retenção hídrica no solo, contribuindo assim para maior produtividade na agricultura familiar.

às estimações realizadas a partir de dados climáticos muito agregados (como precipitação em nível nacional), que tendem a mascarar a heterogeneidade no crescimento econômico.

Por outro lado, similar a Kahn *et al* (2021), Mohaddes *et al* (2023) e outros trabalhos, o efeito negativo no crescimento gerado por desvios térmicos positivos dispara um sinal de alerta para o Brasil. No Nordeste e no Semiárido, por exemplo, mesmo com as características climáticas de calor e insolação, o aumento de apenas 0.01° C acima da média promove um decréscimo no PIB *per capita* de aproximadamente 0.06 pontos percentuais, ou tendo em vista o aumento médio anual destas áreas⁸⁰, impacto negativo de 0.2 e 0.24 pontos percentuais no PIB *per capita*, respectivamente. Além disso, sobre estas áreas (assim como visto na seção 3.2) deve haver uma preocupação ainda maior sobre o impacto social causado nas famílias rurais e suas condições de subsistência. Como visto acima, um aumento de 0.01° C pode acarretar uma queda de 0.13 e 0.18 p.p., no Valor Adicionado Agropecuário do Nordeste e do Semiárido, respectivamente, e causar danos como insegurança alimentar, aumento das desigualdades sociais entre o urbano e o rural, ondas migratórias, entre outros problemas.

No Sudeste se observa as mesmas características, com destaque para o Rio de Janeiro. Em ambos os casos, apresentam-se localidades onde as altas temperaturas levam as políticas, envolvendo mudanças climáticas, serem deixadas de lado, amparadas principalmente pela subjetividade do seu efeito sobre os indivíduos. Entretanto, deve-se lembrar que os indivíduos mais suscetíveis ao calor são as pessoas das classes mais baixas, seja o sertanejo no interior do Semiárido ou o morador de alguma comunidade no Rio de Janeiro. Logo, os contornos de problemas de crescimento econômico podem transbordar também para questões socioeconômicas e de desenvolvimento.

Sendo assim, tendo em vista principalmente o problema geral causado pela elevação da temperatura, se faz necessário que os governos Federal e Estaduais coloquem em prática políticas climáticas que fortaleçam tanto a capacidade adaptativa quanto a mitigação dos fatores que impactam negativamente o clima, como por exemplo uma política de proteção ambiental crível. Atrasar ainda mais os esforços para resolver ou mitigar esse problema, tendo em vista a evolução da mudança climática no mundo, pode causar ainda mais danos ao crescimento econômico e pôr em risco um futuro com mais igualdade no país.

⁸⁰ Resultados na seção 3.6.

4. ANÁLISE DA VARIAÇÃO CLIMÁTICA INTERMUNICIPAL E SEUS EFEITOS NA ATIVIDADE ECONÔMICA DO MUNICÍPIOS BRASILEIROS DE 1999 A 2019

4.1. INTRODUÇÃO

Dentro da ciência econômica, muitos autores já observaram que certas dotações geográficas e climáticas influenciam no crescimento e desenvolvimento dos países. À vista disso, trabalhos como Sachs e Warner (1997), Bloom e Sachs (1998) e Sachs (2001) argumentam, dentre outras coisas, que a localização tropical das nações leva ao baixo crescimento ou ao subdesenvolvimento através de diversos mecanismos, como por exemplo, fragilidade e baixa fertilidade dos solos, alta evaporação e oferta instável de água, fraca estação chuvosa, entre outros.

Na mesma linha de pesquisa Bloom, Canning e Sevilla (2003) concluíram que, em um modelo múltiplo equilíbrio, países sem favorecimento geográfico (países sem acesso ao mar, tropicais ou com chuvas esparsas) possuem baixa renda no equilíbrio de *low-level* e com poucas chances de saírem deste nível. Nesse sentido, em Gallup, Sachs e Mellinger (1999), os autores também mostram que a localização geográfica e as características climáticas das nações possuem grandes efeitos sobre os níveis de renda.

Já para Roy (2023), a tropicalidade é uma combinação de aridez, chuvas sazonais e concentradas, temperaturas elevadas e alta variabilidade intra e interanual de influxo de umidade. De acordo com o mesmo estudo, devido a estes fatores, o aumento de desemprego (ou subemprego), queda na produtividade agrícola, subinvestimento (pela aversão ao risco) e falta de liberdade surgem com mais vigor nas áreas tropicais que na zona temperada, tornando-as assim mais pobres.

É fácil notar que, para esses autores, a questão tropical é um fator causal comum de atraso. Em meio a diversas características que rodeiam esse tópico, muitos elementos aparecem como culpados: temperatura, chuva, solo, etc. Entretanto, poucos desastres naturais tem a capacidade de impactar tanto na realidade socioeconômica de uma área, independentemente da sua localização, como a seca conseguiu, por exemplo, no Nordeste brasileiro (GTDN - GRUPO DE TRABALHO PARA O DESENVOLVIMENTO DO NORDESTE, 1959; CARVALHO,

1973; GUERRA, 1981) ou no caso do *Dust Bowl* americano⁸¹ (HANSEN, 2004; HORNBECK, 2012).

De forma simples, a seca pode ser entendida como um fenômeno causado pela falta de chuvas (WMO, 2025). Contudo, limitar-se a esta definição, estritamente meteorológica⁸², faz com que conceitos como severidade ou intensidade sejam difíceis de determinar⁸³. Ainda que auxiliem a entender o conceito de seca, apenas os dados sobre chuvas não proporcionam uma medida estatística adequada, especialmente para áreas mais secas (WILHITE e GLANZ, 1985, p. 2). Isto ocorre, pois, a deficiência na precipitação é comum a todas as secas, podendo ocorrer tanto em áreas com alta, quanto em áreas de baixa incidência pluviométrica, ou seja, tal fenômeno climático é relativo à condição de uma média de longo prazo no equilíbrio entre chuvas e evapotranspiração, de uma área particular, conhecido como “normal” (WILHITE e GLANZ, 1985, p. 112)⁸⁴.

Nesse contexto meteorológico, boa parte dos impactos diretos das secas são sobre a agricultura e oferta de água pública para consumo humano (BROWN, MEEKS, *et al.*, 2011; STAHL, KOHN, *et al.*, 2016; GAUTIER, DENIS e LOCATELLI, 2016; ZAVERI, DAMANIA e ENGLE, 2023), pois a umidade do solo e oferta de água por precipitação são pontos essenciais para estes setores. Do mesmo modo, com o passar do século XXI, este cenário tornou-se ainda mais grave em decorrência dos avanços das mudanças climáticas (STANKE, KERAC, *et al.*, 2013; ADAAWEN, RADEMACHER-SCHULZ, *et al.*, 2019). Com o aquecimento global ampliando os danos gerados por secas na Europa, a elevação de 4° C levará a aproximadamente uma redução de 10% no produto agrícola da região (NAUMANN, CAMMALLERI, *et al.*, 2021, p. 485).

No caso das regiões subtropicais, espera-se que as mudanças climáticas reduzam a vegetação e amplifiquem os efeitos iniciais da seca. Isto posto, simulações mostram que, ao incluir uma interação vegetação-albedo⁸⁵, a área de deserto expandirá 34%, 20 pontos

⁸¹ Seca ocorrida na América do Norte, em meados dos anos 30, e que causou a maior e mais prolongada seca dos Estados Unidos, para mais detalhes consultar (HANSEN e LIBECAP, 2004; HORNBECK, 2012; COOK, 2019; NDMC, NATIONAL DROUGHT MITIGATION CENTER, 2025)

⁸² Palmer (1965) e Mishra e Singh (2010) apresentam, cada um, 7 definições diferentes possíveis, tamanha é a complexidade do tópico.

⁸³ Wilhite e Glanz (1985) coloca que a severidade de uma seca é muito difícil de determinar, pois, depende da sua duração, intensidade, extensão geográfica e também das demandas de atividades humanas e vegetações. No caso do Nordeste, por exemplo, o solo do tipo cristalino é um agravante (SUASSUNA, 2019).

⁸⁴ Em outras palavras, uma seca em uma área úmida é diferente de uma seca em uma área árida em termos de déficit de chuvas.

⁸⁵ Interação entre a vegetação de cobertura e a quantidade refletida de energia solar para a atmosfera.

percentuais a mais que o caso sem interação (ZENG, 2009, p. 2). Mesmo no aspecto familiar rural, famílias que sobrevivem em condições climáticas mais quentes e secas são mais propensas a não consumir três refeições mínimas diárias (WATTS, HUTTON, *et al.*, 2024).

Além disso, por este último ponto, é possível depreender que o significado da seca não pode ser separado da configuração da estrutura fundiária e do contexto social, bem como de seus impactos (WILHITE e GLANZ, 1985, p. 9). Isto significa que não se deve ficar restrito apenas à análise de resultado sobre chuvas, colheitas, produtividade agrícola ou safras, pois os problemas causados na esfera social (fome, migração e liberdade (ROY, 2023)), podem se tornar um ciclo vicioso ainda mais preocupante.

Esta complexidade dos efeitos das secas, como citado por Wilhite, Svoboda e Hayes (2007)⁸⁶, faz com que sua propagação se aprofunde nos mais diversos setores da vida social através de um efeito cascata (CONVENÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS DE COMBATE À DESERTIFICAÇÃO, 2023). Na área da saúde, por exemplo, a seca pode causar aumento de doenças mentais, como mudanças de humor pelo estresse, suicídio e depressão, e doenças físicas como má-nutrição infantil, problemas devido qualidade/quantidade de água, entre outras como foi apontado no primeiro capítulo deste trabalho (VINS, BELL, *et al.*, 2015; FLEMING-MUÑOZ, WHITTEN e BONNETT, 2023).

Por outro lado, em países como Etiópia, Quênia e Somália o casamento infantil se ampliou juntamente com intensificação das secas, ou seja, como resultado da fome e miséria oriundas das secas, os dotes tornam-se um dos poucos caminhos para a alimentação do restante da família ou para garantir um pouco mais de cuidado da criança através do noivo (UNICEF, 2022). A partir de uma perspectiva de gênero, autores como Hyland e Russ (2019) mostram que mulheres, em domicílios rurais, que são expostas as condições de seca na infância são menos saudáveis na fase adulta, recebem menos educação e podem gerar bebês mais magros (até 2,5 quilos a menos). Nesta situação, Fleming-Muñoz, Whitten e Bonnett (2023) justificam que as mulheres podem se tornar menos saudáveis no meio rural por realizarem o dobro de atividade física (soma de atividades domésticas com trabalho rural).

Sob a ótica da violência, observa-se que devido o aumento do estresse econômico oriundo das secas, encontra-se uma relação positiva para o aumento de roubos, mas não crimes violentos (GOIN, RUDOLPH e AHERN, 2017), e um maior índice de violência por cônjuge

⁸⁶ Os autores mostram que o recente cenário de seca nos Estados Unidos tem se tornado cada vez mais complexo, atingindo setores industriais, entretenimento, turismo, energia, contexto social e meio ambiente.

(VINS, BELL, *et al.*, 2015)⁸⁷. Já em relação aos conflitos interfronteiriços e civis, também se observou que a falta de políticas para oferta hídrica, em concomitância com um estado de seca, proporcionou um ambiente adicional de instabilidade nos conflitos sírios (GLEICK, 2014; KELLEY, MOHTADI, *et al.*, 2015). No Sahel⁸⁸, conflitos entre fazendeiros e pastores de animais, além de tensões sobre recursos hídricos, tem se tornado cada vez mais comuns, o que, futuramente, pode desencadear conflitos violentos e insegurança ainda maior na região (ADAAWEN, RADEMACHER-SCHULZ, *et al.*, 2019).⁸⁹

Tendo em vista estes exemplos, é possível perceber como as secas podem causar impactos negativos no crescimento e desenvolvimento de uma economia. Seja a partir de danos sociais (e, como consequência, na produtividade do trabalho) ou outros danos indiretos (que ainda assim podem impactar na produção), observa-se que, dentre os desastres naturais, a seca provoca o maior impacto médio, com perdas cumulativas de até 1% no PIB *per capita* (RADDATZ, 2009). Além disso, pensando em crescimento e desigualdade econômica, tais problemas se tornam mais relevantes, ao notar que a maior vulnerabilidade a esses impactos se encontram exatamente nos países em desenvolvimento ou mais pobres (RASMUSSEN, 2004; TOYA e SKIDMORE, 2007; NOY, 2009; RADDATZ, 2009; ZAVERI, DAMANIA e ENGLE, 2023).

Por fim, consolidado os prejuízos supracitados, este trabalho procura analisar os efeitos das secas sobre a economia brasileira ao verificar se a sua severidade possui uma relação positiva com a economia de determinada área, ou seja, busca verificar se os conjuntos de entes federados municipais mais pobres (com menor PIB) sofrem com secas mais severas através de uma metodologia *threshold* com estimação endógena dos intervalos⁹⁰. Além disso, diferentemente da bibliografia anteriormente apresentada, que se limita a analisar os efeitos climáticos sobre a economia, este estudo avança nessa discussão ao estimar, também, os limiares de severidade da seca a partir dos quais os impactos do clima se tornam significativamente relevantes para a atividade econômica.

⁸⁷ Novamente, é mais plausível que estes resultados sejam consequência de um efeito cascata das secas sobre a renda agrícola, impacto nas áreas mais pobres, desemprego, etc (GOIN, RUDOLPH e AHERN, 2017, p. 2).

⁸⁸ Região semiárida da África que separa o Deserto do Saara, ao norte, e as savanas tropicais, ao sul (ONU, 2025a).

⁸⁹ Existem ainda análises que mostram ligação entre crises de subsistência, que podem ser geradas por secas, com a consolidação de estrutura de poder (ROY, 2023). Por outro lado, o mesmo estudo, ainda sugere que o colonialismo, ao se estabelecer em locais com maior abundância hídrica, criou-se formas de desigualdade: entre áreas portuárias e interior, mais seco. (ROY, 2023)

⁹⁰ Assim como Hansen (1999).

Como o clima do Brasil é extremamente complexo⁹¹, mesmo as abordagens que utilizam os estados como unidades amostrais não possuem a capacidade de captar com acurácia suficiente as questões climáticas. Por exemplo, mesmo localizados no estado do Ceará, os municípios de Guaramiranga e Jaguaribe possuem uma temperatura média de 24,6° C e 27,8° C, respectivamente⁹², uma diferença média de 3,2° C! Além disso, como citado anteriormente, apenas a utilização de dados pluviométricos pode ser considerada uma falha metodológica na análise das secas, ainda mais em um país continental e climaticamente tão plural, por ser altamente limitante nos cálculos relativos a própria seca, mas também a sua severidade.

Para contornar todos estes problemas, primeiramente, o presente estudo em vez de usar dados nacionais ou estaduais, como maior parte do referencial sobre a seca, possui uma amostra desagregada em nível municipal, que neste caso são as menores unidades possíveis com os dados disponibilizados. Além do mais, quanto ao quesito severidade, por mais que a desagregação amostral pudesse auxiliar com as complicações provenientes da realidade brasileira, esta pesquisa também procurou avançar ainda mais sobre o referencial atual ao colocar como variável independente o índice de seca SPEI, isto é, medir com maior precisão os problemas da severidade no produto interno, assim como utilizar um índice atual e com diversos benefícios frente ao seus predecessores.

Ao proporcionar a discussão nesta abordagem *threshold*, conclui-se que a economia brasileira possui sensibilidade a severidade da seca e quanto menores os índices do SPEI (respectivo a maior severidade) estivessem os conjuntos de municípios, menor tende ser o PIB destes entes. Quanto a visão regional, mostrou-se que todas as regiões acompanham esta mesma característica, com destaque para o Nordeste e o Sul: a primeira apresentou uma realidade altamente sensível, ou seja, qualquer índice de severidade abaixo do normal já pode colocar o município em um conjunto economicamente pior. Já na segunda, apenas o *threshold* respectivo ao SPEI severamente seco comporta municípios com relação negativa entre seca e PIB. Neste caso há indicação de que apenas aqueles entes em pior condição de seca podem ser vistos no conjunto relacionado a um PIB menor.

Ademais, além dessa seção introdutória, este capítulo é composto por uma segunda seção, que especifica os dados e a metodologia utilizada, incluindo uma explicação sobre a variável

⁹¹Pode ser visto em Nimer (1989) esta complexidade: Norte quente e úmido, Nordeste quente e seco, Sudeste é uma faixa de transição entre o Nordeste e o Sul, com clima ameno em algumas épocas e extremamente frio em outras.

⁹² Uma média calculada de 1999 a 2019.

SPEI, empregada para captar a severidade da seca. A terceira seção é composta pelos resultados alcançados no estudo e, por último, a quarta seção com considerações finais.

4.2. DADOS E METODOLOGIA

4.2.1. SPEI

Como observado na seção anterior, a seca é um fenômeno extremamente complexo, com os mais diversos efeitos na vida econômica e humana, mas que normalmente é identificada apenas como um nível deficitário de chuvas. Sob esta perspectiva, ainda que se mantenha certa lógica, encobrem-se diferentes fatores necessários para uma análise mais profunda sobre o tema, como é o caso da severidade e intensidade.

Um dos modos mais recomendáveis para condensar as informações pertinentes são através dos índices de seca, nos quais contém representações numéricas da sua severidade e servem, essencialmente, para fornecer avaliações qualitativas. (SVOBODA, FUCHS e IDMP, 2016, p. 3).

Dependendo do foco e da análise desejados pode ser escolhido um determinado grupo de índices dentre as diversas opções existentes, como por exemplo: índices meteorológicos (que possuem, dentre alguns parâmetros, precipitação, temperatura, evapotranspiração, teor de água disponível)⁹³, os que visam analisar a umidade do solo, os hidrológicos (que se concentram na oferta de água), de sensoriamento remoto (que incluem informações de satélite) e os compostos ou modelados (múltiplos indicadores são utilizados juntos) . (SVOBODA, FUCHS e IDMP, 2016, p. 7-9).

Devido a vários fatores, como a complexidade dos parâmetros para a construção desses índices, suas utilizações podem se tornar muito restritas. Sendo assim, dentre os índices mais utilizados estão o PDSI (*Palmer Drought Severity Index*) e o SPI (*Standardized Precipitation Index*). O primeiro é calculado a partir de dados de precipitação e temperatura, assim como o teor de água no solo e possui como intuito medir tanto a “secura” (valores negativos) quanto a umidade (valores positivos), baseado nos conceitos de oferta e demanda da equação de balanço hídrico⁹⁴ (precipitação, umidade do solo, escoamento e

⁹³ Ademais podem ser utilizados para um leque mais amplo de situações.

⁹⁴ Tradução do inglês: *balanced water equation*. Também chamada de equação de Penck-Oppokov por ter sido creditada primeiramente para Albrecht Penck e E. V. Oppokov (UNESCO, 1971, p. 14):

$$P = R + E \pm \Delta G$$

Onde: P é precipitação; R é escoamento (ou “runoff”); E é evapotranspiração e ΔG é a variação das águas subterrâneas.

evapotranspiração) (ALLEY, 1984; VICENTE-SERRANO, BEGUERÍA e LÓPEZ-MORENO, 2010). Por mais que os parâmetros utilizados não sejam demasiadamente complexos, muitas críticas são feitas sobre esse índice. Em parte, alguns problemas já foram contornados⁹⁵, porém, deficiências na escala temporal fixa (entre 9 e 12 meses) e sua característica autorregressiva, na qual os valores dos índices são afetados por condições de 4 anos no passado, ainda prejudicam sua utilização (VICENTE-SERRANO, BEGUERÍA e LÓPEZ-MORENO, 2010; VICENTE-SERRANO, 2012).

Já o SPI, diferentemente do índice anterior, utiliza apenas a precipitação como parâmetro, sendo que tal construção pode ser vista como benéfica devido a sua simplicidade e parcimonia de dados. Além disso, outro ponto positivo advém da sua capacidade de capturar os impactos específicos dos déficits hídricos acumulados sobre questões hidrológicas, ambientais, agrícolas e outras secas (devido diferenças temporais, particulares de cada um desses sistemas, no uso dos recursos hídricos) através da multiescalaridade (por exemplo 3, 6, 12, 24 ou 48 meses)⁹⁶ (VICENTE-SERRANO, BEGUERÍA e LÓPEZ-MORENO, 2010, p. 1697; VICENTE-SERRANO, 2012, p. 4; SVOBODA, FUCHS e IDMP, 2016, p. 14). Entretanto, a simplicidade desse índice acaba também prejudicando seu uso, pois ao utilizar apenas precipitação, não leva em conta outras variáveis que tem a capacidade de impactar na seca (como temperatura, evapotranspiração, velocidade do vento, entre outros) ou o papel do aquecimento global, como indutor da seca, não é considerado (VICENTE-SERRANO, BEGUERÍA e LÓPEZ-MORENO, 2010, p. 1697; VICENTE-SERRANO, 2012, p. 5; SVOBODA, FUCHS e IDMP, 2016, p. 14).

Já o SPEI (*Standardised Precipitation-Evapotranspiration Index*) foi primeiramente proposto por (VICENTE-SERRANO, BEGUERÍA e LÓPEZ-MORENO, 2010) como uma melhora nos índices de seca que eram utilizados para estudos do efeito do aquecimento global e severidade da seca até então, como PDSI e SPI. Assim como o PDSI, o SPEI considera o efeito de referência da evapotranspiração na severidade da seca, entretanto, com sua natureza multiescalar⁹⁷ do SPI, permite a identificação de diferentes tipos de seca e

⁹⁵ Em princípio, pelo fato de originalmente serem calibrados e testados principalmente para os Estados Unidos e por problemas de comparabilidade de áreas e período de calibração, houveram muitas restrições ao seu uso. Porém esses problemas foram contornados através da criação do *self-calibrated Palmer Drought Severity Index* (sc-PDSI).

⁹⁶ Esses são os valores originalmente calculados em McKee, Doesken e Kleist (1993), mas pode haver outras escalas como 1, 9 ou 60 meses, por exemplo.

⁹⁷ Como consequência em diferentes sistemas agrícolas, áreas específicas, etc.

impactos em diversos intervalos⁹⁸. Sendo assim, sua qualidade está na união dos benefícios observados nestes principais índices: sua sensibilidade acompanha a do PDSI, como medida da demanda evaporativa atmosférica, oriunda da variação de outras variáveis além da precipitação (como temperatura) e a simplicidade de cálculo com sua forma multiescalar, do SPI⁹⁹. Além disso, ao apresentar estas melhorias, o SPEI permite englobar a análise dos efeitos do aquecimento global na severidade da seca, além de permitir a identificação de diversos tipos de seca e impactos em diferentes sistemas produtivos (VICENTE-SERRANO, BEGUERÍA e LÓPEZ-MORENO, 2010, p. 1698; VICENTE-SERRANO, 2012, p. 5; BEGUERÍA, VICENTE-SERRANO, *et al.*, 2013).

Por fim, do mesmo modo que os índices explicitados anteriormente, o SPEI também possui uma categorização de seus valores com a respectiva intensidade da seca. Devido ao cálculo do SPEI ter como base o SPI (VICENTE-SERRANO, BEGUERÍA e LÓPEZ-MORENO, 2010; SVOBODA, FUCHS e IDMP, 2016) ambos índices compartilham a mesma classificação, assim como apresentado por US Drought Monitor (2024)¹⁰⁰. Contudo, como o *US Drought Monitor* se limita as categorias de secas mais intensas, este estudo se baseará na classificação apresentada no Quadro 2, oriunda de NASA (2024) e Copernicus European Drought Observatory (2024)¹⁰¹.

⁹⁸ Importante destacar que, no presente trabalho, sempre que for utilizado o SPEI nas estimações e resultados será considerado sempre o SPEI-12, para se ajustar a escala temporal anual das demais variáveis.

⁹⁹ Como não é o foco deste trabalho mostrar os pormenores da construção de índice, indica-se a leitura de Vicente-Serrano et al. (2010), Vicente-Serrano et al. (2012) e Belguería, Vicente-Serrano *et al* (2013).

¹⁰⁰ O US Drought Monitor é produzido através de uma parceria entre o *National Drought Mitigation Center* da Universidade de Nebraska-Lincoln, do *United States Department of Agriculture and the National Oceanic e Atmospheric Administration*.

¹⁰¹ Programa que visa desenvolver serviços de informação europeu baseados em satélite e dados não-espaciais, no qual o time de análise da seca é o *European Commission Joint Research Center* da União Europeia.

Quadro 2 – Classificação de severidade da seca de acordo com o SPEI

Categoria de Umidade	SPEI
Extremamente Úmido	$SPEI \geq 2$
Severamente Úmido	$1.5 \leq SPEI < 2$
Moderadamente Úmido	$1 \leq SPEI < 1.5$
Próximo do Normal	$-1 < SPEI < 1$
Moderadamente Seco	$-1.5 < SPEI \leq -1$
Severamente Seco	$-2 < SPEI \leq -1.5$
Extremamente Seco	$SPEI \leq -2$

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.2. Metodologia

A metodologia usada para este trabalho seguirá Hansen (1999) que desenvolveu um modelo de regressão de dados em painel (não-dinâmicos) com efeito *threshold* apresentado como:

$$y_{it} = \mu_i + \beta'_1 x_{it} I(q_{it} \leq \gamma) + \beta'_2 x_{it} I(q_{it} > \gamma) + e_{it} \quad (8)$$

em que y_{it} é a variável dependente, μ_i é o efeito individual, x_{it} são os regressores, $I(.)$ é uma função indicadora, q_{it} é a variável threshold, γ é o parâmetro de threshold que divide a equação em dois regimes, com coeficientes β_1 e β_2 , e e_{it} o erro da regressão. Numa formação mais compacta pode-se representar (1) como:

$$y_{it} = \mu_i + \beta' x_{it}(\gamma) + e_{it} \quad (9)$$

Sendo que:

$$x_{it} = \begin{pmatrix} x_{it} I(q_{it} \leq \gamma) \\ x_{it} I(q_{it} > \gamma) \end{pmatrix} \text{ e } \beta = (\beta'_1 \beta'_2)'$$

Tomando as médias de (8) sobre o tempo e subtraindo de (9) temos que:

$$y_{it}^* = \beta' x_{it}^*(\gamma) + e_{it}^* \quad (10)$$

A equação (10) pode ser escrita ainda na forma matricial,

$$Y^* = X^*(\gamma)\beta + e^* \quad (11)$$

onde $Y_{n(T-1) \times 1}^*$, $X_{n(T-1) \times m}^*$ e $e_{n(T-1) \times 1}^*$ denotam dados empilhados sobre todos os indivíduos. Para qualquer γ dado, o parâmetro β pode ser estimado por MQO, ou seja,

$$\hat{\beta}(\gamma) = (X^*(\gamma)'X^*(\gamma))^{-1}X^*(\gamma)'Y^* \quad (12)$$

Definindo a soma dos quadrados do resíduo como:

$$\begin{aligned} S_1(\gamma) &= \hat{e}^*(\gamma)' \hat{e}^*(\gamma) = [Y^* - X^*(\gamma)\hat{\beta}(\gamma)]' [Y^* - X^*(\gamma)\hat{\beta}(\gamma)] = \\ &= Y^{*'} \left(I - X^*(\gamma)(X^*(\gamma)X^*(\gamma))^{-1}X^*(\gamma)' \right) Y^* \end{aligned} \quad (13)$$

Consequentemente o estimador de mínimos quadrados de γ é:

$$\hat{\gamma} = \underset{\gamma}{\operatorname{argmin}} S_1(\gamma) \quad (14)$$

uma vez que $\hat{\gamma}$ é obtido então $\beta = \hat{\beta}(\hat{\gamma})$.

Para testar a hipótese da não existência de efeito threshold, $H_0: \beta_1 = \beta_2$, considera-se um procedimento bootstrap para simular uma distribuição assintótica do teste de razão de verossimilhança não padrão (pois sobre a hipótese nula γ não é identificado). Esse teste é baseado em:

$$F_1 = \frac{S_0 - S_1(\hat{\gamma})}{\hat{\sigma}^2} \quad (15)$$

Hansen (1996) mostra que p-valores construídos de um procedimento bootstrap são assintoticamente válidos. Especificamente para essa pesquisa, a hipótese nula é rejeitada se o p-valor for menor que o valor crítico de 5%.

Já para testar a hipótese do valor de $\hat{\gamma}$ ser consistente para γ_0 , Hansen (2000) argumenta que o melhor caminho é construir intervalos de confiança para γ é na forma de uma “região de não-rejeição” usando uma estatística de razão de verossimilhança para testar $H_0: \gamma = \gamma_0$. Essa hipótese é rejeitada para grandes valores de $LR_1(\gamma_0)$ onde

$$LR_1(\gamma) = (S_1(\gamma) - S_1(\hat{\gamma}))/\hat{\sigma}^2 \quad (16)$$

No caso de múltiplos thresholds temos o modelo:

$$y_{it} = \mu_i + \beta_1' x_{it} I(q_{it} \leq \gamma_1) + \beta_2' x_{it} I(\gamma_1 < q_{it} \leq \gamma_2) + \beta_3' x_{it} I(\gamma_2 < q_{it}) + e_{it} \quad (17)$$

onde os *thresholds* são ordenados de modo que $\gamma_1 < \gamma_2$.

Para dado (γ_1, γ_2) , a equação (16) é linear nos parâmetros, então a estimação por MQO é apropriada. Logo, para dado (γ_1, γ_2) a soma dos quadrados do resíduo concentrada $S(\gamma_1, \gamma_2)$ se calcula assim como no modelo com único threshold. A estimativa de mínimos quadrados conjunta de (γ_1, γ_2) é definida pelos valores que conjuntamente minimizam $S(\gamma_1, \gamma_2)$.

Diferentemente do caso com um *threshold*, onde apenas é observado se F_1 rejeita a hipótese nula de não haver threshold, no contexto do modelo (16) é necessário fazer um teste adicional para discriminar se há um ou mais thresholds.

Para isso parte-se do pressuposto que o primeiro *threshold*, $\hat{\gamma}$, seja conhecido e estimado minimizando $S_1(\gamma)$. Tendo fixado esse primeiro estágio, o critério do segundo estágio é:

$$S_2^r(\gamma_2) = \begin{cases} S(\hat{\gamma}_1, \gamma_2) & \text{se } \hat{\gamma} < \gamma_2 \\ S(\gamma_2, \hat{\gamma}_1) & \text{se } \gamma_2 < \hat{\gamma}_1 \end{cases} \quad (18)$$

e o estimador threshold do segundo estágio é:

$$\gamma_2^r = \underset{\gamma_2}{\operatorname{argmin}} S_2^r(\gamma_2) \quad (19)$$

As hipóteses nula e alternativamente são separadamente H_0 : *há somente 1 threshold* e H_1 : *presença de 2 thresholds*. Então um teste da razão de verossimilhança de 1 vs 2 thresholds pode ser baseado na estatística:

$$F_2 = S_1(\hat{\gamma}_1) - S_2^r(\hat{\gamma}_2^r)/\hat{\sigma}^2 \quad (20)$$

onde $\hat{\sigma}^2 = S_2^r(\hat{\gamma}_2^r)/n(T - 1)$. A hipótese nula é rejeitada se F_2 é grande.

Contudo Bai (1997) mostra que $\hat{\gamma}_2^r$ é assintoticamente eficiente, mas $\hat{\gamma}_1$ não, pois tal estimativa foi obtida através da soma do quadrado dos resíduos contaminado pela presença de um regime negligenciado. A eficiência assintótica de $\hat{\gamma}_2$ sugere que $\hat{\gamma}_1$ pode ser melhorado por um terceiro estágio. Como sugere Bai (1997), fixando o estimador do segundo estágio ($\hat{\gamma}_2$), o critério de refinamento do estimador é

$$S_1^r(\gamma_1) = \begin{cases} S(\gamma_1, \hat{\gamma}_2^r) & \text{se } \gamma_1 < \hat{\gamma}_2^r \\ S(\hat{\gamma}_2^r, \gamma_1) & \text{se } \hat{\gamma}_2^r < \gamma_1 \end{cases} \quad (21)$$

e o estimador refinado

$$\hat{\gamma}_1 = \min_{\gamma_1} S_1^T(\gamma_1) \quad (22)$$

Percebe-se que $\hat{\gamma}_1^r$ e $\hat{\gamma}_2^r$ tem a mesma distribuição assintótica como visto no modelo de apenas um threshold isso significa que, para testar a validade do efeito *threshold*, pode-se construir intervalos de confiança do mesmo modo que em (16).

4.2.2.1. Modelo

A partir dessa metodologia, o presente trabalho analisa a relação entre economia e clima a partir do modelo a seguir:

$$\ln(y_{i,t}) = \mu + \beta_1 SPEI_{i,t} I(SPEI_{i,t} < \gamma) + \beta_2 SPEI_{i,t} I(SPEI_{i,t} \geq \gamma) + u_i + e_{i,t} \quad (23)$$

onde $y_{i,t}$ é o PIB municipal, $SPEI_{i,t}$ é o *Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI)*; γ é o parâmetro do *threshold* que divide a equação em diferentes regimes, com coeficientes β_1 e β_2 , respectivamente; u_i é o efeito individual e $e_{i,t}$ o distúrbio.

Ao observar a equação (23) este capítulo pode ser considerado “parcimonioso”, pois a única variável independente incluída no modelo foi o SPEI. Contudo, tal decisão fundamenta-se em extenso referencial de análise do crescimento econômico com o clima, tal qual Gallup, Sachs e Mellinger (1999), Bloom, Canning e Sevilla (2003), Barrios, Bertinelli e Strobl (2010), Brown, Meeks *et al.* (2011), Ng e Zhao (2011), Dell, Jones e Olken (2012), Brown, Meeks *et al.* (2013), Damania, Desbureaux e Zaveri (2020), Kahn, Mohaddes *et al.* (2021), Kotz, Levermann e Wenz (2022), Mohaddes, NG, *et al.* (2023), entre outros, que apresentam apenas a inclusão da variável climática.

Além disso, ao utilizar uma variável climática como *threshold*, o modelo acima apresenta a condição em que a variável *threshold* (γ) deve ser exógena como em (HANSEN, 1999).

Por fim, para esta estimação, será utilizado o comando *xthreg* desenvolvido por Wang (2015) para o Stata¹⁰², que assim como Hansen (1999), calcula o valor do *threshold* endogenamente.

¹⁰² Para as estimações foi utilizado o software *STATA 17 MP-Paralell Edition*.

4.2.3. Amostra

A amostra compreende dados anuais dos municípios brasileiros no período de 1999 a 2019. Os dados sobre o SPEI foram obtidos da mesma forma que Oliveira (2023). Já os dados sobre população residente e PIB são oriundos do IBGE (2023b), este último com valores reais de 2010 calculados a partir do deflacionamento com o deflator implícito do PIB, obtido no IPEDATA¹⁰³. Vale destacar que apenas municípios com a série completa para estas variáveis foram utilizados, totalizando uma amostra de 5179 entes brasileiros.

Tabela 8 – Valores médios da amostra para o Brasil e Macrorregiões (1999-2019)

Região	PIB (R\$ mil)(R\$ 2010)	Valor		Nº de Municípios
		Adicionado Agropecuário (R\$ mil) (R\$ 2010)	PIB <i>per capita</i> (R\$ 2010)	
Brasil	582.252.187,21	36.205,17	12.487,49	5.179
Norte	472.270.164,22	35.779,47	8.664,71	367
Nordeste	289.845.834,63	17.831,08	5.851,94	1.599
Centro-Oeste	443.461.963,79	63.235,99	16.275,44	439
Sudeste	1.200.689.996,02	26.109,56	14.623,54	1.626
Sul	504.992.977,41	38.069,73	17.021,83	1.148

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tendo em vista um cenário geral sobre o perfil médio do país e macro regiões na Tabela 7, a partir dos dados municipais, percebe-se que a região Nordeste possui uma desconfortável liderança: dentre todas as regiões, é aquela que detém o menor nível de produção (de forma isolada), menor nível de valor adicionado agropecuário e maior nível de pobreza no país¹⁰⁴, ou seja, apresenta as menores condições econômicas e sociais de todo o país. Em seguida, ao considerar o PIB *per capita* da região Norte juntamente com o Nordeste, observa-se que são os únicos entes regionais no estudo que ostentam um valor desta medida abaixo da média nacional, transformando-os em destaque negativo em relação à pobreza regional.

¹⁰³ Com dados oriundos do IBGE (2023b) e do Sistema de Contas Nacionais

¹⁰⁴ Considerando PIB *per capita* como *proxy* desta medida

Em oposição a esta realidade, é possível notar que o Sul, Sudeste e o Centro-Oeste, possuem os maiores níveis de PIB *per capita* do país, respectivamente. Já sob a questão produtiva, não é surpresa alguma o Sudeste estar acima da média brasileira seguida pela região Sul. Quanto ao Centro-Oeste, neste quesito, a região fica abaixo da região Norte, como 4ª força produtiva (em média) no Brasil, em relação ao período de 1999 a 2019¹⁰⁵.

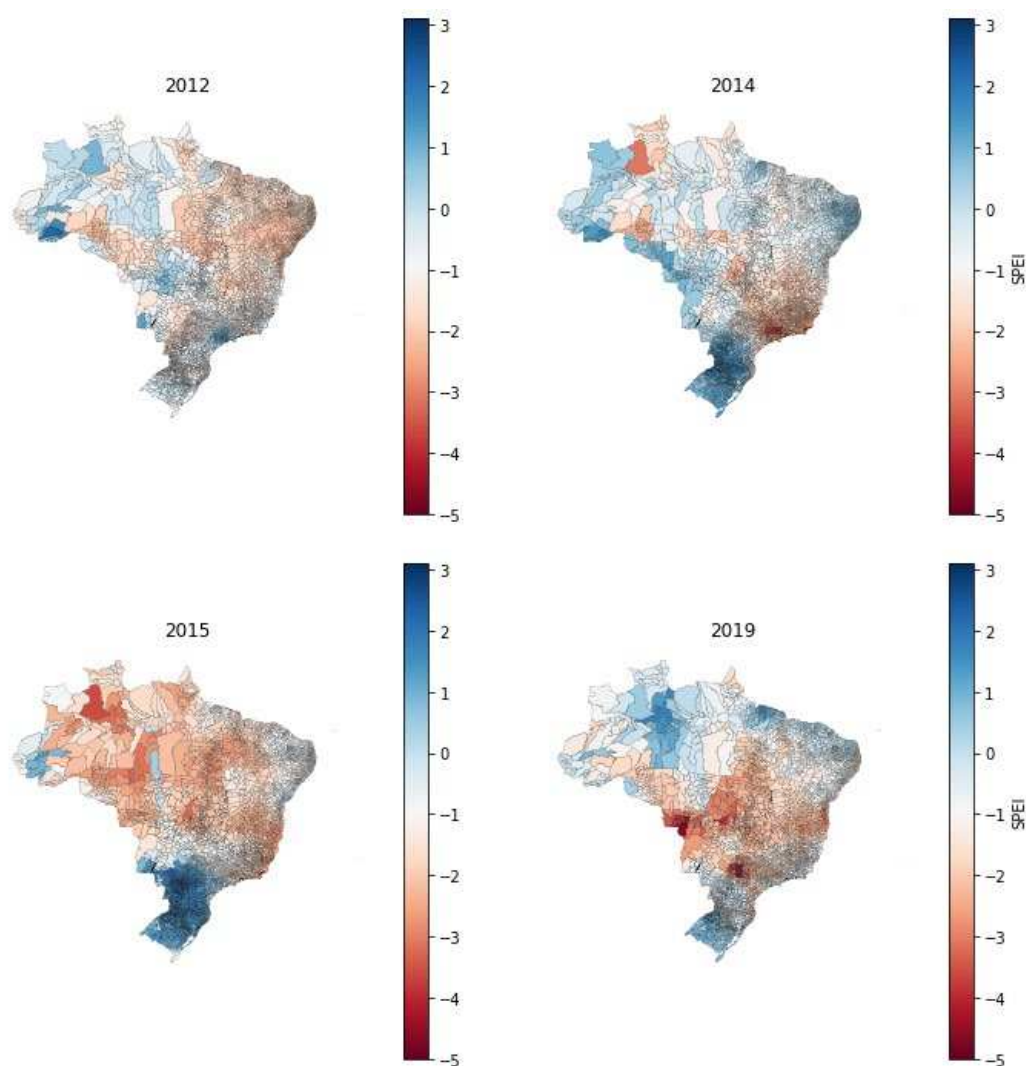
No caso do SPEI, devido a sua construção em intervalos, o cálculo da média não traz qualquer resposta útil para alguma indagação sobre a severidade da seca. Desta forma, a fim de exemplificar as questões regionais, separaram-se alguns anos que se destacaram no Brasil em relação a seca, seja na imprensa ou em artigos¹⁰⁶.

Ao visualizar a Figura 8 é possível perceber, por exemplo, que nem mesmo a região Norte, conhecida pela umidade e volume das chuvas, escapou da adversidade e sofreu com a seca em parte do seu território em 2012 e 2014, e praticamente toda a região em 2015. No caso da região Nordeste, que sempre sofreu com a realidade de seca severa, teve problemas sérios em 2012. Já em 2014, o Sudeste brasileiro, que outrora não era imaginado neste contexto, destacou-se com os maiores valores do SPEI (maior severidade), nem mesmo alcançando o Nordeste no quesito seca, fato que se repetiu em 2019. Pelo lado do Centro-Oeste, coração do setor agropecuário nacional, os anos de alarme ficam por conta de 2015 e 2019.

¹⁰⁵ Deve ser levado em consideração a produção industrial do Norte, tendo em vista a presença da Zona Franca de Manaus.

¹⁰⁶ Neves e Vilanova (2021); Coelho, Cardoso e Firpo (2016); Costa (2022); Rebello (2018) e Correio Braziliense (2010)

Figura 8 – Distribuição espacial da severidade da seca no Brasil em diferentes anos (a partir do SPEI)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Através destes indicadores, atesta-se que a seca é um desastre natural que não deve ser pesquisado apenas considerando o volume das chuvas, desconectados das realidades regionais brasileiras. Esta última posição, equivocada, pode levar ao entendimento popular que apenas a região Nordeste do país é local para esta situação. Logo, ao levar em conta estes contextos relativos, ou seja, específico de cada área, deve-se ter em mente que os resultados na próxima seção, possuem um maior nível de confiabilidade.

4.3. RESULTADOS

Primeiramente, ao observar a Tabela 8 percebe-se que o Brasil apresenta distinção no nível do PIB para conjuntos de municípios em diferentes condições de seca. Em

consonância com a categorização apresentada pelo Quadro 2, municípios abaixo do nível severamente seco tendem a apresentar os menores níveis de PIB do país, assim como apenas os municípios pelo menos moderadamente úmidos devem apresentar PIB maiores. Mais detalhadamente, em municípios abaixo de severamente seco, qualquer piora na seca pode reduzir o PIB municipal em cerca de 8%. Isto mostra que, dentro do território nacional, apenas os municípios mais úmidos exibem uma relação positiva da economia, representado pelo PIB, e a severidade da seca, representado pelo SPEI.

Os impactos da seca sobre produto municipal podem ocorrer por múltiplos canais. Em primeiro lugar, secas prolongadas reduzem a produtividade agropecuária, especialmente em regiões dependentes da agricultura de sequeiro, afetando diretamente o valor adicionado do setor primário. Em segundo lugar, a queda na produção e na renda rural pode gerar efeitos multiplicadores negativos sobre o comércio, o emprego informal e a arrecadação local, comprometendo a atividade nos demais setores da economia. A escassez de água e os estresses térmicos também impactam a produtividade do trabalho urbano, tanto por motivos fisiológicos quanto por aumento de custos operacionais. Além disso, efeitos adversos da seca estão associados a indicadores de saúde, como aumento de doenças respiratórias e hídricas, o que compromete a força de trabalho e amplia os custos sociais. Em conjunto, esses mecanismos ajudam a explicar por que os municípios expostos a secas mais severas tendem a registrar níveis persistentemente mais baixos de PIB municipal.

Tabela 9 – Valores dos Thresholds e Coeficientes para o Brasil

Nº de Thresholds	Threshold	Classificação SPEI		Coeficientes
γ_1	-1.6573***	severamente seco	$q_{it} \leq \gamma_1$	-0.0799***
γ_2	1.0639***	moderadamente úmido	$\gamma_1 < q_{it} \leq \gamma_2$	-0.02424***
			$\gamma_2 < q_{it}$	0.030376***

*: significante a 10%; **: significante a 5%; ***: significante a 1%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Além disso, quanto mais seca for a categoria em questão, mais negativa tende a ser essa relação, ou seja, similar ao apresentado por Zaveri, Damania e Engle (2023): quanto

pior for a situação de seca do município menor será a condição econômica deste ente federativo.

Tabela 10 – Valores dos Thresholds e Coeficientes para a Região Norte

Nº de Thresholds	Threshold	Classificação SPEI		Coeficientes
γ_1	-1.8304***	severamente seco	$q_{it} \leq \gamma_1$	-0.13662***
γ_2	1.1904**	moderadamente úmido	$\gamma_1 < q_{it} \leq \gamma_2$	-0.06731***
			$\gamma_2 < q_{it}$	-0.00549

*: significante a 10%; **: significante a 5%; ***: significante a 1%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Essas características nacionais se mantêm para a Região Norte, isto é, conjuntos de municípios divididos por severamente seco e moderadamente úmido e quanto mais grave for a seca, pior a relação com o PIB. Entretanto, como mostra a Tabela 9, os municípios mais severamente secos sofrem mais perdas no PIB, em caso de seca, se comparados aos resultados nacionais, uma redução de 13% no PIB.

Outro ponto que merece destaque é que, tanto no Brasil como na região Norte, os municípios situados no intervalo entre condições severamente secas e moderadamente úmidas (ou seja, aqueles que apresentam algum nível de umidade ou alívio climático) tendem a apresentar níveis de PIB mais baixos. Esse resultado pode indicar que, mesmo diante de condições climáticas relativamente mais favoráveis, ainda persiste a ausência de práticas adaptativas eficazes que contribuam para a melhoria das condições econômicas nesses locais.

Tabela 11 – Valores dos Thresholds e Coeficientes para a Região Nordeste

Nº de Thresholds	Threshold	Classificação SPEI		Coeficientes
γ	0.97***	próximo do normal	$q_{it} \leq \gamma$	-0.08506***
			$q_{it} > \gamma$	-0.02673***

*: significante a 10%; **: significante a 5%; ***: significante a 1%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Já na Tabela 10, ao analisar a região Nordeste, conhecida por seus baixos níveis de precipitação¹⁰⁷ e temperatura elevada, verifica-se a existência de apenas um *threshold*, isto é, diferentemente das demais regiões, há uma maior pressão das secas sobre a realidade econômica. Neste caso, municípios presentes nesta região com qualquer nível de seca abaixo do normal já apresentam um menor nível de PIB e, por conseguinte, maior intensidade em todas as consequências sociais que a acompanha. Além disso, por mais que todos os municípios tenham efeito negativo do SPEI no produto, os entes federativos no grupo abaixo do normal possuem um impacto ainda menor do SPEI no PIB comparativamente aos mais úmidos, ou seja, os mais pobres acabam sofrendo mais.

Tabela 12 – Valores dos Thresholds e Coeficientes para a Região Centro-Oeste

Nº de Thresholds	Threshold	Classificação SPEI		Coeficientes
γ_1	-1.6256***	severamente seco	$q_{it} \leq \gamma_1$	-0.09113***
γ_2	0.623***	próximo do normal	$\gamma_1 < q_{it} \leq \gamma_2$	-0.03637***
			$\gamma_2 < q_{it}$	0.039281***

*: significante a 10%; **: significante a 5%; ***: significante a 1%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com relação ao Centro-Oeste e o Sudeste, nas Tabela 11 e Tabela 12 respectivamente, mais uma vez percebe-se a presença de dois *thresholds*, contudo, para estas regiões as categorias são: severamente seco e normal. A partir dessa categorização é possível concluir, juntamente com a estimação dos coeficientes, que apenas os municípios acima do normal, isto é, apenas os municípios úmidos possuem uma relação positiva entre o SPEI e o PIB, sendo que, aqueles incluídos no conjunto abaixo do normal não somente apresentam menor relação entre o PIB e o SPEI, mas quanto mais seco for o conjunto de municípios (mais seca a categorização) menor é esta relação.

¹⁰⁷ Há também irregularidade na distribuição das chuvas no tempo e no espaço, assim como visto na seção 3.3.6.2.

Tabela 13 – Valores dos Thresholds e Coeficientes para a Região Sudeste

Nº de Thresholds	Threshold	Classificação SPEI		Coeficientes
γ_1	-1.6122***	severamente seco	$q_{it} \leq \gamma_1$	-0.07064***
γ_2	-0.9679***	próximo do normal	$\gamma_1 < q_{it} \leq \gamma_2$	-0.03128***
			$\gamma_2 < q_{it}$	0.02963***

*: significante a 10%; **: significante a 5%; ***: significante a 1%

Fonte: Elaborado pelo autor.

É interessante notar que, isto posto, mesmo as regiões que não são historicamente marcadas por secas ou popularmente conhecidas por problemas com este desastre natural, sofrem com a mesma característica negativa entre secas e economia.

Para a região Sul, na Tabela 13, apenas os municípios com a pior condição climática na região (condição mais grave em questão de seca) apresentam consequências negativas do clima em sua economia, ou seja, somente aqueles em severa ou extrema seca. Logo, diferentemente do observado na região Nordeste, o Sul do país apresenta uma pressão menor quanto a este desastre natural na economia, pois, mesmo os municípios em seca moderada, assim como os que apresentam umidade normal ou acima, apresentam uma relação positiva entre o PIB e o clima¹⁰⁸. Além disso, mesmo nos municípios severamente secos as perdas do PIB municipal com o aumento da seca são menores que o observado no âmbito nacional, 6% contra aproximadamente 8% no Brasil.

Tabela 14 – Valores dos Thresholds e Coeficientes para a Região Sul

Nº de Thresholds	Threshold	Classificação SPEI		Coeficientes
γ	-1.7471***	severamente seco	$q_{it} \leq \gamma$	-0.05616***
			$q_{it} > \gamma$	0.057364***

*: significante a 10%; **: significante a 5%; ***: significante a 1%

Fonte: Elaborado pelo autor.

¹⁰⁸ Resultados com PIB *per capita* mostraram as mesmas características: no Brasil e demais regiões os conjuntos de municípios mais secos apresentaram menor PIB *per capita* e, em contraposição, os mais úmidos possuem PIB *per capita* maior.

Em suma, os resultados mostram forte convergência com a literatura que associa variáveis climáticas extremas a perdas no desempenho econômico, especialmente em contextos de baixa renda. A evidência de que municípios mais afetados pela seca registram níveis persistentemente inferiores de PIB é compatível com os achados de Barrios, Bertinelli e Strobl (2010), que identificam o papel central da precipitação no crescimento econômico da África Subsaariana, e com os trabalhos de Dell, Jones e Olken (2009, 2012), Burke e Tanutama (2019) e Kalkuhl (2020), que documentam efeitos negativos da elevação da temperatura sobre o crescimento em países mais pobres. Ainda que o índice SPEI capture uma dimensão integrada da variabilidade climática, os padrões observados aqui reforçam a hipótese de que choques ambientais afetam de forma mais aguda territórios estruturalmente vulneráveis.

4.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em síntese, observou-se neste capítulo, a partir de uma abordagem de *thresholds*, que há uma relação de não-linearidade entre o PIB e a condição de seca, representada pelo SPEI. Logo, constatou-se que o nível de severidade da seca se relaciona negativamente com o produto, ou seja, quanto mais secos forem os municípios, menor será a relação entre os respectivos produtos internos e este fenômeno. Por conseguinte, nacional ou regionalmente, a questão climática tem impacto significativo na economia, no qual municípios em piores situações de seca exibem PIBs menores.

Além disso, tendo em vista os caminhos nos quais os danos deste fenômeno natural permeiam a economia, este resultado, ao promover a discussão sobre as secas no âmbito de sua severidade no produto interno, surge como novo ponto de vista para políticas públicas voltadas ao desenvolvimento local e regional. Deve-se pensar que as atuais políticas de gestão e gerenciamento de secas devem não somente refletir a preocupação com a oferta hídrica de forma isolada, mas incluída nas discussões socioeconômicas para evitar os círculos viciosos, antecipados na introdução deste capítulo. Ademais, ações governamentais devem ter em seu cerne a particularidade de cada área, como por exemplo, do Nordeste, no qual qualquer nível de seca abaixo do normal aumenta o impacto negativo no produto, e do Sul, onde apenas os níveis mais extremos possuem efeitos negativos no PIB.

Por fim, devido ao avanço das mudanças climáticas, as conclusões deste capítulo devem ser analisadas com cuidado ainda maior devido ao foco sobre a eventual

maximização de danos sofridos pelos entes federados brasileiros em decorrência das alterações globais, e, em consequência, amplificação dos prejuízos socioeconômicos.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente tese teve por objetivo ampliar o escopo de estudo da economia das mudanças climáticas para uma análise de impactos econômicos que fosse além das políticas de emissão de dióxido de carbono, como é comumente trabalhada. Além disso, procurou-se sobrepor a complexidade climática nacional e os problemas de agregação espacial, recorrentes nessa área, por meio da utilização de dados em nível municipal.

Desse modo, este estudo se aprofundou na compreensão dos impactos das variações climáticas nos municípios brasileiros, tendo em vista dois questionamentos centrais: esse fenômeno terá efeito na economia dos municípios no longo prazo? E, por fim, os municípios mais pobres poderão sofrer mais em comparação àqueles em melhor posição econômica?

Para isso, no primeiro capítulo, observou-se, a partir de um hipotético modelo descritivo, como os fatores de produção podem ser impactados pelas mudanças climáticas e como esses fatores podem canalizar os danos para as atividades produtivas. A discussão mostra que o capital natural, capital físico, mão de obra sem educação e capital humano podem ser afetados pelos mais diversos eventos extremos causados pela variação do clima, sendo que este penúltimo é um dos mais impactados, devido à dificuldade de adaptação associada à forma como esse trabalho é setorialmente aplicado (ao ar livre, por exemplo). Além disso, mostrou-se que as forças produtivas não são atingidas de forma homogênea, destacando-se o agravamento de desigualdades principalmente sobre regiões e grupos socioeconomicamente mais vulneráveis.

Diante dessas análises, sobre os efeitos do clima nos fatores de produção e, por consequência, na produção das regiões e territórios brasileiros, o segundo capítulo buscou analisar se as variações climáticas poderiam impactar a economia no longo prazo. Para isso, o estudo foi realizado por meio de uma estimação em ARDL com variáveis climáticas de temperatura e precipitação.

Como resultado, observou-se que os efeitos da variação de precipitação, em relação ao seu normal meteorológico, sobre o PIB *per capita* e Valor Adicionado Agropecuário apresentaram impactos heterogêneos nas regiões brasileiras. Entretanto, ao se analisarem as mesmas questões em relação à variação térmica encontra-se um efeito negativo generalizado quando a temperatura está acima do seu padrão histórico (com exceção da região Sul), tanto sobre o PIB *per capita*, quanto sobre o Valor Adicionado Agropecuário.

Isso significa que o Aquecimento Global possui a capacidade de impactar negativamente a economia municipal no longo prazo.

No terceiro e último capítulo, foram examinados os efeitos da variabilidade climática numa perspectiva espacial, ou seja, quais são os seus efeitos na economia dos municípios brasileiros. Para isso, foi utilizada uma metodologia de *threshold*, com estimação endógena dos limiares específicos para a variável SPEI em relação à variável dependente PIB municipal.

Como resultado, este estudo indica que o conjunto de municípios sujeitos a condições mais secas, ou seja, aqueles incluídos em regimes com limiares de menor SPEI, tendem a apresentar níveis mais baixos de Produto Interno Bruto.

Isso não quer dizer que o subdesenvolvimento municipal pode ser explicado pelo clima *per se*, pois este nada mais é que um fator adicional nas diversas interações existentes entre ambiente, instituições, entre outros. Contudo, os resultados apresentados nesta tese mostram que as variações climáticas, neste caso exemplificadas pelos desvios da precipitação, desvios da temperatura e seca, ainda possuem a capacidade de interferir negativamente na economia dos municípios brasileiros, provavelmente devido à ausência de políticas capazes de limitar os efeitos do clima sobre os entes municipais. Dito isso, é primordial que o governo federal promova progressivamente políticas internas de adaptação, para que as questões climáticas não interfiram no crescimento e desenvolvimento futuro do país.

De modo geral, os resultados obtidos revelam sinais quanto à vulnerabilidade econômica do Brasil diante das atuais alterações climáticas, as quais tendem a se intensificar no futuro próximo. Nesse sentido, este trabalho não pretende encerrar as discussões existentes sobre o tema, mas sim oferecer uma nova perspectiva sobre as consequências dos efeitos do clima na economia nacional e, dessa maneira, indicar a necessidade de políticas públicas para o enfrentamento desse problema.

6. REFERÊNCIAS

- AB'SÁBER, A. N. Sertões e sertanejos: umageografia humana sofrida. **Estudos Avançados**, São Paulo, 13, n. 36, 1999. 7-59.
- ACEMOGLU, Daron; JOHNSON, Simon; ROBINSON, James A. The colonial origins of comparative development: an empirical investigation. **American Economic Review**, 91, n. 5, dez. 2001. 1369–1401.
- ACEMOGLU, Daron; ROBINSON, James A. Persistence of power, elites, and institutions. **American Economic Review**, 98, n. 1, 2008. 267-293.
- ACEMOGLU, Daron; ROBINSON, James A. **Why nations fail: the origins of power, prosperity, and poverty**. New York: Crown Business, 2012.
- ADAAWEN, S. *et al.* Drought, migration, and conflict in sub-Saharan Africa: what are the links and policy options? In: EVERISTO MAPEDZA, Daniel T. M. B. R. M. **Current Directions in Water Scarcity Research**. [S.l.]: [s.n.], v. 2, 2019. p. 15-31.
- AHRENS, C. D.; SAMSON, P. J. **Extreme weather and climate**. 1. ed. Belmont: Brooks/Cole, 2010.
- ALAGIDEDE, P.; ADU, G.; FRIMPONG, P.B. The effect of climate change on economic growth: evidence from Sub-Saharan Africa. **Environmental Economics Policy Studies**, 18, 2016. 417-436.
- ALDERMAN, Harold; HODDINOTT, John; KINSEY, Bill. Long term consequences of early childhood malnutrition. **Oxford Economic Papers**, 58, n. 3, 2006. 450–474.
- ALLEY, W. M. The Palmer Drought Severity Index: Limitations and Assumptions. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, n. 23, 1984. 1100-1109.
- ALVES, Guillermo. Slum Growth in Brazilian Cities. **CAF – Working Paper**, Caracas, 10, 2016.
- AMARAL FILHO, Jair *et al.* Impactos dos grandes projetos federais em estados nordestinos - Ceará. In: SILVA, Maria L. D.; APOLINÁRIO, Valdênia **Impactos dos Grandes Projetos Federais Sobre os Estados do Nordeste**. Natal: EDUFRN, 2011. p. 141-168.
- AMARAL FILHO, Jair. Reformas Estruturais e Economia Política dos Recursos Hídricos no Ceará. **Texto para Discussão do Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará (IPECE)**, Fortaleza, 7, 2003.
- AMARAL FILHO, Jair D.; PENNA, Christiano M.; VIEIRA, Francisco H. Análise do desempenho econômico do Nordeste brasileiro, no período 1985-2014, à luz da história das políticas públicas. **Série de Estudos Econômicos do CAEN**, Fortaleza, 43, 2021.
- ARAGÓN, F. M.; OTEIZA, F.; RUD, J. P. Climate Change and Agriculture: Subsistence Farmers' Response to Extreme Heat. **American Economic Journal: Economic Policy**, 13, n. 1, 2021. 1-35.

ARAÚJO, Rachel V. D.; COSTA, Maria C. L. Da migração sertaneja ao surgimento das favelas: a formação socioespacial e vulnerabilidade em Fortaleza, Ceará. **Geosaberes**, Fortaleza, 6, n. 3, 2015. 585-598.

ARCHER, D.; RAHMSTORF, S. **The climate crisis: an introductory guide to climate change**. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.

ARGUEZ, A. *et al.* NOAA's 1981-2010 U.S. Climate Normals: An Overview. **Bulletin of the American Meteorological Society**, 11, n. 93, 2012. 1687-1697.

ARREHNIUS, S. **Worlds in the making: the evolution of the universe**. 1. ed. New York: Harper & Brothers, 1908.

ARRHENIUS, S. On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. **The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science**, 41, n. 251, 1896. 237-276.

ASARE-NUAMAH, P. Climate variability, subsistence agriculture and household food security in rural Ghana. **Heliyon**, 4, 2021.

AVILA, Ana M. H. D. *et al.* Climatic Restrictions for Maximizing Soybean Yields. In: BOARD, James E. **A Comprehensive Survey of International Soybean Research - Genetics, Physiology, Agronomy and Nitrogen Relationships**. [S.l.]: InTech, 2013. p. 367-375.

AZZONI, C. A. *et al.* Geography and Income Convergence among Brazilian States. **IADB Working Paper**, 2000.

BAARSCH, F. *et al.* The impact of climate change on incomes and convergence in Africa. **World Development**, 126, 2020.

BAHN, P.; FLENLEY, J. **Easter Island, Earth Island: The Enigmas of Rapa Nui**. [S.l.]: Rowman & Littlefield, 2017.

BAI, J. Estimating multiple breaks one at a time. **Econometric Theory**, v. 13, p. 315-352, 1997.

BALLESTER, J. *et al.* Heat-related mortality in Europe during the summer of 2022. **Nature Medicine**, 29, 2023. 1857–1866.

BAO, J., S. S. . A. L. E. A. Future increases in extreme precipitation exceed observed scaling rates. **Nature Climate Change**, 7, 2017. 128-132.

BARRIOS, S.; BERTINELLI, L.; STROBL, E. Trends in Rainfall and Economic Growth in Africa: A Neglected Cause of the African Growth Tragedy. **The Review of Economics and Statistics**, 92, n. 2, 2010. 350–366.

BBC, 2024. Disponível em: <https://www.bbc.com/news/articles/cllle947r9lo>. Acesso em: maio 2025.

BECKER, G. S. **Human capital a theoretical and empirical analysis, with special reference to education**. New York: Columbia University Press, 1964.

BEGUERÍA, S. *et al.* Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. **International Journal of Climatology**, 34, n. 10, 2013. 3001–3023.

- BILAL, A.; KÄNZIG, D. R. The Macroeconomic Impact of Climate Change: Global vs. Local Temperature. **NBER**, 2024.
- BLOOM, D. E.; CANNING, D.; SEVILLA, J. Geography and poverty traps. **Journal of Economic Growth**, 8, 2003. 355-378.
- BLOOM, D.; SACHS, J. D. Geography, Demography and Economic Growth in Africa. **Brookings Papers on Economic Activity**, 29, n. 2, 1998. 207-296.
- BOURQUE, F.; WILLOX, A. C. Climate change: the next challenge for public mental health? **International Review of Psychiatry**, 2014. 415-422.
- BROWN, C. *et al.* Hydroclimate risk to economic growth in Sub-Saharan Africa. **Climate Change**, 106, 2011. 621-647.
- BROWN, C. *et al.* Is water security necessary? An empirical analysis of the effects of climate hazards on national level economic growth. **Phil. Trans. R. Soc. A**, 2013.
- BUCKLEY, B. M. *et al.* Climate as a Contributing Factor in the Demise of Angkor, Cambodia. **Proc. Natl. Acad. Sci**, 107, n. 15, 2010.
- BURKE, M.; TANUTAMA., V. Climatic Constraints on Aggregate Economic Output. **National Bureau of Economic Policy Working Paper**, 25779, 2019. 106-140.
- BURZYŃSKI, M.; DOCQUIER, F.; SCHEEWEL, H. The geography of climate migration. **Journal of Demographic Economics**, 87, n. 3, 2021. 345-381.
- CAI, Y.; BROCK, W. Climate Change Impact on Economic Growth: Regional Climate Policy under Cooperation and Noncooperation. **Journal of the Association of Environmental and Resource Economists**, 2023.
- CALLENDAR, G. S. The artificial production of carbon dioxide and its influence on temperature. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, 64, n. 275, 1938. 223-240.
- CARNEIRO, V. A.; CASAROLI, D; SANTOS, F. V. D. Cana-de-Açúcar: Uma Abordagem Climática. **Revista Mirante**, Anápolis, dez. 2015.
- CARVALHO, Otamar D. Plano Integrado para o Combate Preventivo aos Efeitos das Secas no Nordeste, Brasília, 1973.
- CHANDY, L. Economic Development in an Era of Climate Change. **Carnegie Endowment for International Peace**, 2023.
- CHUDIK, A. *et al.* Long-Run Effects in Large Heterogeneous Panel Data Models with Cross_Sectionally Correlated Errors. In: HILL, R. C.; GONZALEZ-RIVERA, G.; LEE, T. H. **Advances in Econometrics**. [S.l.]: Emerald, v. 36, 2016. Cap. 4, p. 85-135.
- CHUDIK, A. *et al.* Is There a Debt-threshold Effect on Output Growth? **Review of Economics and Statistics**, 99, n. 1, 2017. 135-150.
- CHUDIK, Alexander; PESARAN, M. H.; YANG, Jui-Chung. Half-panel jackknife fixed-effects estimation of linear panels with weakly exogenous regressors. **Journal of Applied Econometrics**, 33, 2018. 816-836.

CNN, 2024. Disponível em: <https://edition.cnn.com/2024/07/10/weather/beryl-texas-power-outages-heat-wednesday>. Acesso em: maio 2025.

COELHO, C. A. S.; CARDOSO, D. H. F.; FIRPO, M. A. F. A Seca de 2013 a 2015 na Região Sudeste do Brasil. **Climanálise**, São José dos Campos, 1, 2016.

COFFEL, Ethan D.; HORTON, Radley M.; DE SHERBININ, Alex. Temperature and humidity based projections of a rapid rise in global heat stress exposure during the 21st century. **Environmental Research Letters**, Bristol, 13, n. 1, 2018.

CONAB, Companhia N. D. A.-. **Site da CONAB**, 2024. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/1631-brasil-possui-uma-das-maiores-areas-irrigadas-do-planeta-20171006#:~:text=Segundo%20o%20levantamento%2C%20a%20Regi%C3%A3o,194.002%20h%C3%A1%20v%C3%A9m%20por%20C3%BAltimo>.

CONVENÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS DE COMBATE À DESERTIFICAÇÃO. **The cascading and compounding impacts of drought**. Organização das Nações Unidas. [S.l.]. 2023.

COOK, Ben. **Drought: an interdisciplinary perspective**. Nova York: Columbia University Press, 2019.

COPERNICUS European Drought Observatory, 2024. Disponível em: https://drought.emergency.copernicus.eu/data/factsheets/factsheet_spi.pdf. Acesso em: dez. 2024.

CORREIO BRAZILIENSE. Seca na Região Norte faz Rio Negro atingir nível mais baixo da história. **Correio Braziliense**, 2010. Disponível em: <https://www.correiobraziliense.com.br/app/noticia/brasil/2010/10/25/interna-brasil,219731/seca-na-regiao-norte-faz-rio-negro-atingir-nivel-mais-baixo-da-historia.shtml>. Acesso em: 12 jan. 2025.

COSTA, A. Pior seca recente no CE completa 10 anos: "era quase impossível manter alimento e água para o gado". **Diário do Nordeste**, 2022. Disponível em: <https://diariodonordeste.verdesmares.com.br/ceara/pior-seca-recente-no-ce-completa-10-anos-era-quase-impossivel-manter-alimento-e-agua-para-o-gado-1.3192293>. Acesso em: 12 jan. 2025.

DAHLIN, B. H. Climate and prehistory on the Yucatan peninsula. **Climatic Change**, 5, 1983.

DAMANIA, R.; DESBUREAUX, S.; ZAVERI, E. Does rainfall matter for economic growth? Evidence from global sub-national data (1990-2014). **Journal of Environmental Economics and Management**, 102, 2020.

DE MARIA, Pier F. Pobreza e migração no Brasil metropolitano (1995–2015). **Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais**, 21, n. 3, 2019. 546–566.

DELL, M.; JONES, B. F.; OLKEN, B. A. Climate Change and Economic Growth: Evidence From The Last Half Century. **NBER Working Paper**, 14132, 2008.

DELL, M.; JONES, B. F.; OLKEN, B. A. Temperature and Income: Reconciling New Cross-Sectional and Panel Estimates. **American Economic Review**, 99, n. 2, 2009. 198-204.

DELL, M.; JONES, B. F.; OLKEN, B. A. Temperature Shocks and Economic Growth: Evidence from the Last Half Century. **American Economic Review**, 4, n. 3, 2012. 66-95.

DESSLER, A. E. **Introduction to modern climate change**. 3. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

DIAMOND, J. **Colapso: como as sociedades escolhem o fracasso ou o sucesso**. 5. ed. São Paulo: Record, 2007.

DNOCS, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/dnocs/pt-br/assuntos/noticias/noticia-site-antigo-350>. Acesso em: maio 2025.

DNOCS, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/dnocs/pt-br/assuntos/vem-conhecer/vem-conhecer-o-trabalho-do-dnocs-na-seguranca-de-barragem>. Acesso em: maio 2025.

DNOCS, 2025a. Disponível em: <https://www.gov.br/dnocs/pt-br/assuntos/noticias/agua-que-transforma-o-dnocs-e-o-compromisso-com-a-dignidade-no-semiarido-brasileiro>. Acesso em: maio 2025.

DNOCS, 2025b. Disponível em: <https://www.gov.br/dnocs/pt-br/assuntos/noticias/dnocs-fortalece-seguranca-alimentar-com-acoes-em-aquicultura-irrigacao-e-capacitacao>. Acesso em: maio 2025.

DUNNE, John P. E. A. Reductions in Labour Capacity from Heat Stress Under Climate Warming. **Nature Climate Change**, 2013. 563-566.

EBI, Kristie L. *et al.* Hot weather and heat extremes: health risks. **The Lancet**, 398, n. 10301, 2021. 698-708.

EL KHANJI, S.; HUDSON, J. Water utilization and water quality in endogenous economic growth. **Environment and Development Economics**, 21, n. 5, 2016. 626-648.

FERREIRA, P. C. G.; ELLERY JR., R. G. Convergência entre a renda per-capita dos estados brasileiros. **Brazilian Review of Econometrics**, 16, n. 1, 1996.

FLEMING-MUÑOZ, D. A.; WHITTEN, S.; BONNETT, G. D. The Economics of Drought: A Review of Impacts and Costs. **Australian Journal of Agricultural and Resource Economics**, 67, n. 4, 2023. 501-523.

FOLHA DE SÃO PAULO, 2024. Disponível em: <https://www1.folha.uol.com.br/cotidiano/2024/10/depois-de-24-horas-sp-tem-135-milhao-sem-luz-e-revive-pesadelo-de-apagao.shtml>. Acesso em: maio 2025.

FONTES, P. **Um nordeste em São Paulo: trabalhadores migrantes em São Miguel Paulista, 1945/1966**. Rio de Janeiro: FGV, 2008. 436 p.

FORUM ECONÔMICO MUNDIAL, 2023. Disponível em: <https://www.weforum.org/stories/2023/01/climate-crisis-poor-davos2023/>. Acesso em: abr. 2024.

FOURIER, J. Remarques générales sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires. **Mémoires de l'Académie Royale des Sciences de l'Institut de France**, 1824. 569-604.

FRIED, Harold O.; LOVELL, C. A. K.; SCHMIDT, Shelton S. Efficiency and productivity.. In: FRIED, Harold O.; LOVELL, C. A. K.; SCHMIDT, Shelton S. **The measurement of productive efficiency and productivity change**. New York: Oxford University Press, 2008.

FURTADO, Celso. **Formação econômica do Brasil**. 34. ed. São Paulo: Companhia das Letras, 2007. 352 p.

GALLUP, J. L.; SACHS, J. D.; MELLINGER, A. D. Geography and Economic Development. **International Regional Science Review**, Agosto 1999. 179-232.

GAUTIER, D.; DENIS, D.; LOCATELLI, B. Impacts of drought and responses of rural populations in West Africa: a systematic review. **WIREs Clim Change**, 7, 2016. 666-681.

GLEICK, P. H. Water, drought, climate change, and conflict in Syria. **Weather, Climate, and Society**, 6, n. 3, 2014. 331–340.

GOIN, D.E.; RUDOLPH, K. E.; AHERN, J. Impact of drought on crime in California: A synthetic control approach. **PLoS One**, 12, n. 10, 2017.

GRIFFITHS, J. F. **Applied Climatology: An Introduction**. 2. ed. Londres: Oxford University Press, 1976.

GTDN - GRUPO DE TRABALHO PARA O DESENVOLVIMENTO DO NORDESTE. **Uma política de desenvolvimento econômico para o Nordeste**. Rio de Janeiro: Departamento de Imprensa Nacional, 1959.

GUERRA, Paulo D. B. **A Civilização da Seca**. Fortaleza: DNOCS, 1981.

GUO, J.; KUBLI, D.; SANER, P. **The economics of climate change: no action not an option**. Swiss Re Institute. [S.l.]. 2021.

HADFIELD, Kristin *et al.* “There is no hope; only strong wind”: How climate change impacts adolescent mental health in southern Madagascar. **Journal of Climate Change and Health**, 5, 2025.

HALL, Robert; JONES, Charles. Why Do Some Countries Produce So Much More Output Per Worker Than Others? **The Quarterly Journal of Economics**, 114, 1999. 83-116.

HANNAM, Peter. Queensland power supply to face strain as heatwave sends demand to near-record levels, 2023. Disponível em: <https://www.theguardian.com/australia-news/2023/dec/29/queensland-heatwave-power-supply-strain-energy-grid-electricity-use>. Acesso em: maio 2025.

HANSEN, B. E. Inference when a nuisance parameter is not identified under the null hypothesis. **Econometrica**, 64, 1996. 413-430.

HANSEN, B. E. Threshold effects in non-dynamic panels: Estimation, testing and inference. **Journal of Econometrics**, 93, 1999. 345-368.

HANSEN, B. E. Sample splitting and threshold estimation. **Econometrica**, 68, n. 3, 2000. 575-603.

HANSEN, Z. K.; LIBECAP, G. D. Small farms, externalities, and the Dust Bowl of the 1930s. **Journal of Political Economy**, 112, n. 3, 2004. 665–694.

HARVEY, C.A. *et al.* Climate change impacts and adaptation among smallholder farmers in Central America. **Agriculture & Food Security**, 7, n. 57, 2018.

HAUG, G. H. E. A. Climate and the Collapse of Maya Civilization. **Science**, 2003. 1731-1735.

HODELL, D.; CURTIS, J.; BRENNER, M. Possible role of climate in the collapse of Classic Maya Civilization. **Nature**, 375, 1995. 391-394.

HOPE, C. W.; ANDERSON, J.; WENMAN, P. Policy Analysis of the Greenhouse Effect – An application of the PAGE model. . **Energy Policy**, 21, n. 3, 1993. 327–338.

HORNBECK, R. The enduring impact of the American Dust Bowl: Short- and longrun adjustments to environmental catastrophe. **American Economic Review**, 102, n. 4, 2012. 1477–1507.

HYLAND, M.; RUSS., J. Water as Destiny: The Long-term Impacts of Drought in Sub Saharan Africa. **World Development**, 115, 2019. 30–45.

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia**, 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/estrutura-territorial/15819-amazonia-legal.html?=&t=sobre>. Acesso em: maio 2024.

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia**, 2023a. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/al>. Acesso em: 2024.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia, 2023b. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 2024.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia, 2023c. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/rj>. Acesso em: 2024.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia, 2023d. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/estrutura-territorial/15761-areas-dos-municipios.html>. Acesso em: 2024.

INMET, 2023. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/noticias/zona-de-convergencia-intertropical-zcit>. Acesso em: maio 2025.

INPE, 2024. Disponível em: <http://enos.cptec.inpe.br/>. Acesso em: maio 2025.

IPCC. **Climate Change: The IPCC 1990 and 1992 Assessments**. World Meteorological Organization; United Nations Environment Programme. Genebra, p. 178. 1992.

IPCC. Climate Change 2001: Synthesis Report. In: WATSON, R. T. E. A. **A Contribution of Working Groups I, II, III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge e Nova York: Cambridge University Press, 2001. p. 398.

IPCC. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press, 2021. 2391 p.

ISON, Nicky. What happened to our electricity system in the heat? Coal and gas plants failed. **The Guardian**, 2019. Disponível em: <https://www.theguardian.com/commentisfree/2019/jan/31/what-happened-to-our-electricity-system-in-the-heat-coal-and-gas-plants-failed?> Acesso em: maio 2025.

KAHN, Matthew E. *et al.* Long-Term Macroeconomics Effects of Climate Change: A Cross-Country Analysis. **Energy Economics**, 2021.

KALKUHL, M. E. L. W. The impact of climate conditions on Economic Production. Evidence from a global panel of regions. **Journal of Environmental Economics and Management**, 103, 2020.

KEBEDE, D. Impact Climate Change on Livestock Productive and Reproductive Performance. **Livestock Research for Rural Development**, 28, n. 12, 2016.

KELLEY, C. P. *et al.* Climate change in the Fertile Crescent and implications of the recent Syrian drought. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, 112, n. 11, 2015. 3241–3246.

KENNETT, D. J. *et al.* Drought-Induced Civil Conflict Among the Ancient Maya. **Nature**, 2022.

KHANJI, S. E.; HUDSON, J. Water utilization and water quality in endogenous economic growth. **Environment and Development Economics**, 21, 2016. 626-648.

KHOUALFIA, A.; BARDI, W. The effect of climate change on economic growth in European countries: an empirical evidence from Panel ARDL approach. **Environ Sci Pollut Res**, 32, 2025. 736–748.

KOTZ, M. *et al.* Day-to-day temperature variability reduces economic growth. **Nature**, 11, 2021. 319-325.

KOTZ, M. *et al.* Constraining the Pattern and Magnitude of Projected Extreme Precipitation Change in a Multimodel Ensemble. **Journal of Climate**, 37, n. 1, 2024a. 97-111.

KOTZ, M.; LEVERMANN, A.; WENZ, L. The effect of rainfall changes on economic production. **Nature**, n. 601, 2022. 223-227.

KOTZ, M.; LEVERMANN, A.; WENZ, L. The economic commitment of climate change. **Nature**, n. 628, 2024b. 551–557.

LI, Y. *et al.* Local cooling and warming effects of forests based on satellite observations. **Nature**, 2015.

LIMA, M. *et al.* Ecology of the collapse of Rapa Nui society. **Proc. R. Soc. B**, 2020.

LISBOA, Sílvia. **Dialogue Earth**, 2025. Disponível em: <https://dialogue.earth/pt-br/alimentos/um-ano-enchentes-agricultores-gauchos-rs-dividas-medo/>. Acesso em: maio 2025.

- LLOYD, S. J.; KOVATS, R. S.; CHALABI, Z. Climate change, crop yields, and undernutrition: development of a model to quantify the impact of climate scenarios on child undernutrition. **Environmental Health Perspectives**, 119, n. 12, 2011. 1817–1823.
- LUCAS, R. E. J. On the mechanics of economic development. **Journal of Monetary Economics**, 22, 1988. 3-42.
- MADZIGA, I. I. Impact of Climate Change on Livestock Productivity: A Review. **Nigerian Journal of Animal Production**, 48, n. 4, 2021. 149-164.
- MALTHUS, Thomas R. **An essay on the principle of population**. Londres: J. Johnson, 1798.
- MARENGO, José A. *et al.* **Climate Change Risks in Brazil**. [S.l.]: Springer, 2019.
- MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales. **Eighth Conference on Applied Climatology**, Anaheim, 1993. 17-22.
- MCMANUS, C.M *et al.* Pecuária e Mudanças Climáticas. **Revista UFG**, 2012. 73-84.
- MEADOWS, Donella H. *et al.* **Os Limites do Crescimento**: um relatório para o Projeto do Clube de Roma sobre o dilema da humanidade. 1. ed. São Paulo: Perspectiva, 1973.
- MEDINA-ELIZABETH, M.; ROHLING, E. J. Collapse of Classic Maya Civilization Related to Modest Reduction in Precipitation. **Science**, 2012. 956-959.
- MENDELSON, Robert. Climate Change and Economic Growth. **Working Paper / Commission on Growth and Development**, Washington, DC, 60, 2009.
- MENDONÇA, Francisco. **Climatologia**: Noções básicas e clima do Brasil. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.
- MEYGHANI, S.; MASHHADI, M. K.; SALEHNIA, N. Long-term effects of temperature and precipitation on economic growth of selected MENA region countries. **Environment, Development and Sustainability**, 2023. 7325-7343.
- MINCER, J. Schooling, Experience and Earnings. , **National Bureau of Economic Research (NBER)**, Nova York, 1974.
- MINISTÉRIO da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, dez. 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/politica-agricola/todas-publicacoes-de-politica-agricola/agropecuaria-brasileira-em-numeros/agropecuaria-brasileira-em-numeros-janeiro-de-2020/view>.
- MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2025a. Disponível em: <https://www.gov.br/saude/pt-br/assuntos/saude-de-a-a-z>. Acesso em: maio 2025.
- MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2025b. Disponível em: <https://www.gov.br/saude/pt-br/assuntos/saude-de-a-a-z/o/ondas-de-calor>. Acesso em: maio 2025.
- MISHRA, A.K.; SINGH, V.P. A review of drought concepts. **Journal of Hydrology**, 391, 2010. 202-216.

- MITCHELL, A.; MAHEENB, H; BOWENB, K. Mental health impacts from repeated climate disasters: an Australian longitudinal analysis. **The Lancet Regional Health – Western Pacific**, 47, n. 101087, 2024.
- MOHADDES, Kamiar *et al.* Climate change and economic activity: evidence from US states. **Oxford Open Economics**, 2, 2023.
- MORTON, John. F. The impact of climate change on smallholder and subsistence agriculture. **PNAS**, 2007.
- MOURA, H. A. D. Impactos das Mudanças Demográficas sobre as Demandas Sociais nas Metrópoles do Nordeste. **Caderno de Estudos Sociais**, Recife, 3, n. 3, jul./dez. 1987. 241-268.
- MOUTINHO, Lúcia M. G. *et al.* Impactos dos grandes projetos federais na economia de Pernambuco e proposições políticas. In: SILVA, Maria L. D.; APOLINÁRIO, Valdênia **Impactos dos Grandes Projetos Federais Sobre os Estados do Nordeste**. Natal: EDUFRN, 2011. p. 221-244.
- MUKHERJEE, M.; FRANSEN, S. Exploring migration decision-making and agricultural adaptation in the context of climate change: A systematic review. **World Development**, 179, 2024.
- MYERS, N. Environmental refugees: a growing phenomenon of the 21st century. **Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci.**, 357, n. 1420, 29 Abril 2002. 609-613.
- NASA, 2009. Disponível em: <https://earthobservatory.nasa.gov/world-of-change/ENSO>. Acesso em: maio 2025.
- NASA, 2024. Disponível em: <https://gmao.gsfc.nasa.gov/research/subseasonal/atlas/SPI.html/SPI-description.html#McKee1993>. Acesso em: dez. 2024.
- NASA, 2024a. Disponível em: <https://science.nasa.gov/earth/explore/el-nino/>. Acesso em: maio 2025.
- NATIONAL WEATHER SERVICE (US GOVERNMENT), 2025. Disponível em: <https://www.weather.gov/ama/heatindex?> Acesso em: maio 2025.
- NAUMANN, G. *et al.* Increased economic drought impacts in Europe with anthropogenic warming. **Nature Climate Change**, 11, 2021. 485-491.
- NDMC, NATIONAL DROUGHT MITIGATION CENTER, 2025. Disponível em: <https://drought.unl.edu/dustbowl/>. Acesso em: jan. 2025.
- NEVES, A. D. O.; VILANOVA, M. R. N. Caracterização da seca histórica da década de 2010 na Bacia do Rio Paraíba do Sul, Estado de São Paulo, Brasil. **Eng Sanit Ambient**, 26, n. 2, 2021. 339-349.
- NEWELL, Richard G.; PREST, Brian C.; SEXTON, Steven E. The GDP-temperature relationship: Implications for climate change damages. **Journal of Environmental Economics and Management**, 108, 2021.
- NG, Pin; ZHAO, Xiaobing. No matter how it is measured, income declines with global warming. **Ecological Economics**, 70, 2011. 963-970.

- NIE, P. *et al.* Global Climate Change, Mental Health, and Socio-Economic Stressors: Toward Sustainable Interventions across Regions. **Sustainability**, 16, n. 8693, 2024.
- NIMER, Edmon. **Climatologia do Brasil**. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 1989.
- NIRANJAN, Ajit. Heat deaths in Europe may triple by end of the century, study finds. **The Guardian**, 2024. Disponível em: <https://www.theguardian.com/society/article/2024/aug/21/heat-deaths-in-europe-may-triple-by-end-of-the-century-study-finds>.
- NOAA, 2024. Disponível em: <https://www.noaa.gov/explainers/understanding-climate-normals>.
- NORDHAUS, W. D. To slow or not to slow: The economics of the greenhouse effect. **The Economic Journal**, 101, n. 407, 1991. 920–937.
- NORDHAUS, W. D. The DICE Model: Background and Structure of a Dynamic Integrated Climate-Economy Model of the Economics of Global Warming. **Cowles Foundation Discussion Papers**, 1992a.
- NORDHAUS, W. D. An Optimal Transition Path for Controlling Greenhouse Gases. **Science**, 258, n. 5086, 1992b. 1315–1319.
- NORDHAUS, W. D. Reflections on the Economics of Climate Change. **Journal of Economic Perspectives**, 7, 1993.
- NORDHAUS, W. D. **Managing the Global Commons: The Economics of Climate Change**. [S.l.]: MIT Press, 1994.
- NORDHAUS, W. D. Geography and Macroeconomics: New Data and New Findings. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)**, 103, 2006.
- NORDHAUS, W. D. Can We Control Carbon Dioxide? (From 1975). **American Economic Review**, 109, n. 6, 2019. 2015–2035.
- NORDHAUS, W. D., 2025. Disponível em: <https://williamnordhaus.com/testimony-reports-and-working-papers>. Acesso em: maio 2025.
- NORDHAUS, W. D.; BOYER, Joseph. **Warming the world: economic models of global warming**. [S.l.]: MIT Press, 2000.
- NORTH, Douglass C. **Institutions, institutional change and economic performance**. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
- NORTH, Douglass C. Institutions. **Journal of Economic Perspectives**, Nashville, 5, n. 1, 1991. 97-112.
- NOY, I. The macroeconomic consequences of disasters. **Journal of Development Economics**, 88, n. 2, 2009. 221–231.
- OBRADOVICH, N. *et al.* Empirical evidence of mental health risks posed by climate change. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, 115, n. 43, 2018. 10953–10958.

OJIMA, R.; FUSCO, W. Migrações e nordestinos pelo Brasil: uma breve contextualização. In: OJIMA, R.; FUSCO, W. **Migrações Nordestinas no Século 21 - Um Panorama Recente**. São Paulo: Edgard Blücher, 2015. Cap. 1, p. 11-26.

OLIVEIRA, G. Adaptation to climate change and agricultural productivity in Brazil. **Trabalho em Progresso**, 2023.

ONU. Organização das Nações Unidas, 2024. Disponível em: <https://www.un.org/en/climatechange/science/climate-issues/human-security>. Acesso em: 2024.

ONU. Organização das Nações Unidas, 2025a. Disponível em: <https://africarenewal.un.org/en>. Acesso em: 12 jan. 2025.

ONU. Organização das Nações Unidas , 2025b. Disponível em: https://brasil.un.org/pt-br/175180-o-que-s%C3%A3o-mudan%C3%A7as-clim%C3%A1ticas?afd_azwaf_tok=eyJhbGciOiJSUzI1NiJ9.eyJhdWQiOiJicmFzaWwudW4ub3JnIiwiaXhwLjoxNzQ4MjgwNDUwLCJpYXQiOiJlY3NDgyODA0NDAsImlzcyI6InRpZXIxLWI4OTQ2ZGY0NiIsInN1YiI6IjE4Ny4xOC4yMTAu. Acesso em: mar. 2025.

PAGLIALUNGA, E.; COVERI, A.; ZANFEI, A. Climate change and within-country inequality: New evidence from a global perspective. **World Development**, 159, 2022.

PALMER, W.C. Meteorologic Drought. **US Department of Commerce, Weather Bureau, Research Paper**, 45, 1965.

PEÑA-LÉVANO, L.M.; TAHERIPOUR, F.; TYNER, W.E. Climate Change Interactions with Agriculture, Forestry Sequestration, and Food Security. **Environmental Resource Economics**, 74, 2019. 653–675.

PENNY, D. E. A. The Demise of Angkor: Systemic Vulnerability of Urban Infraestructure to Climatic Variations. **Science Advances**, 4, 2018.

PESARAN, M. H. The Role of Economic Theory in Modelling the Log Run. **Economic Journal**, 1997. 178-191.

PESARAN, M. H.; SHIN, Y. An Autoregressive Distributed Lag Modelling Approach to Cointegration Analysis. In: STROM, S. **Econometrics and Economics Theory in 20th Century: The Ragnar Frisch Centennial Symposium**. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. Cap. 11, p. 371-413.

PESARAN, M. H.; SMITH, R. Estimating Long-Run Relationships from Dynamic Heterogeneous Panel. **Journal of Econometrics**, 1995. 79-113.

PLASS, Gilbert N. The carbon dioxide theory of climate change. **Tellus**, 8, n. 2, 1956. 140-154. Disponível em: <https://doi.org/10.3402/tellusa.v8i2.8969>.

RADDATZ, C. E. The Wrath of God: Macroeconomic Costs of Natural Disasters. **World Bank Policy Research Working Paper**, n. 5039, 1 Setembro 2009.

RASMUSSEN, T. N. (. Macroeconomic implications of natural disasters in the Caribbean. **IMF Working Paper**, n. 224, 2004.

- REBELLO, A. Seca de 2012 a 2017 no semiárido foi a mais longa na história do Brasil. **UOL**, 2018. Disponível em: <https://noticias.uol.com.br/meio-ambiente/ultimas-noticias/redacao/2018/03/03/seca-de-2012-a-2017-no-semiarido-foi-a-mais-longa-da-historia.htm>. Acesso em: 12 jan. 2025.
- REUTERS, 2024. Disponível em: <https://www.reuters.com/world/europe/power-blackout-hits-montenegro-bosnia-albania-croatias-adriatic-coast-2024-06-21/>. Acesso em: maio 2025.
- RICHARD, S.J.T. The damage costs of climate change toward more comprehensive calculations. **Environmental and Resource Economics**, 5, 1995. 353–374.
- ROHLI, Robert V.; VEGA, Anthony J. **Climatology**. 4. ed. Burlington: Jones & Bartlett Learning, 2018.
- ROJAS-DOWNING, M. M. *et al.* Climate Change and Livestock: Impacts, Adaptation, and Mitigation. **Climate Risk Management**, 16, 2017. 145-163.
- ROY, T. The Development of Arid Tropics: Lessons for Economic History. **Economic History of Developing Regions**, 38, n. 2, 2023. 151-172.
- SACHS, J. D. Tropical Underdevelopment. **NBER Working Paper**, 2001.
- SACHS, J.D.; WARNER, A. M. Fundamental Sources of Long-Run Growth. **The American Economic Review**, 87, n. 2, Maio 1997. 43-76.
- SALDANHA, Raphael D. F. *et al.* Zonal Statistics of Climate Indicators from ERA5-Land for Brazilian Municipalities, 1950-2022. **Environmental Data Science**, 3, 2024. Disponível em: <https://zenodo.org/records/10036212>.
- SCHAEFFER, R. *et al.* Climate Change and the Energy Sector in Brazil. In: BRAZIL, Climate C. R. I. Nobre, C., Marengo, J., Soares, W. [S.l.]: Springer, 2019.
- SCHAEFFER, Roberto *et al.* Energy sector vulnerability to climate change: A review. **Energy**, 38, n. 1, 2012. 1-12.
- SCHULTZ, T. W. **O valor econômico da educação**. Rio de Janeiro: Zahar Editores, 1964.
- SHANKLIN, J. D.; FARMAN, J. C.; GARDINER, B. G. Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO_x/NO_x. **Nature**, 315, n. 16, maio 1985. 207-210.
- SOS Mata Atlântica. **https://www.sosma.org.br**, 2020. Disponível em: <https://www.sosma.org.br/noticias/desmatamento-municipios-mata-atlantica-2018-2019/>. Acesso em: 28 out. 2024.
- SOUZA HACON, S. D.; OLIVEIRA, B. F. A. D.; SILVEIRA, I. A review of the health sector impacts of 4 °C or more temperature rise. In: NOBRE, C.; MARENGO, J.; SOARES, W. **Climate change risks in Brazil**. [S.l.]: Springer, 2019. p. 67-84.
- STAHL, K. *et al.* Impacts of European drought events: insights from an international database of text-based reports. **Nat. Hazards Earth Syst. Sci.**, 16, 2016. 801–819.
- STANKE, C. *et al.* Health effects of drought: a systematic review of the evidence. **PLoS Curr**, 2013.

STERN, N. **Stern Review: The Economics of Climate Change**. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.

SUASSUNA, João. **Ministério da Educação**, 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/fundaj/pt-br/destaques/observa-fundaj-itens/observa-fundaj/artigos-de-joao-suassuna/semi-arido-proposta-de-convivencia-com-a-seca>. Acesso em: maio 2025.

SVOBODA, Mark; FUCHS, Brian; IDMP, Integrated D. M. P. **Handbook of Drought Indicators and Indices**. Genebra: [S.n.], 2016.

TERRA, 2024. Disponível em: <https://www.terra.com.br/planeta/apagao-em-sp-100-mil-estao-sem-energia-eletrica-pelo-5-dia-seguido%2C7a7f06ac8b00c674fa5f36097fa8df5d5okzya42.html?> Acesso em: maio 2025.

THE NOBEL PRIZE, 2018. Disponível em: <https://www.nobelprize.org/prizes/economic-sciences/2018/prize-announcement/>. Acesso em: abr. 2025.

THOMPSON, Rhiannon E. A. Ambient temperature and mental health: a systematic review and meta-analysis. **The Lancet Planetary Health**, 7, n. 7, 2023. e580-e589.

TIRUNEH, S.; TEGENE, F. Impacts of Climate Change on Livestock Production and Productivity and Different Adaptation Strategies in Ethiopia. **Journal of Applied and Advanced Research**, 3, n. 3, 2018.

TOL, R. S. The Economic Effects of Climate Change. **Journal of Economic Perspectives**, 23, 2009. 29-51.

TOL, Richard S. J. **Climate economics: economic analysis of climate, climate change and climate policy**. 2. ed. Cheltenham: Edward Elgar, 2019.

TOYA, H; SKIDMORE, M. Economic development and the impacts of natural disasters. **Economic Letters**, 94, 2007. 20-25.

TYNDALL, John. On the absorption and radiation of heat by gases and vapours, and on the physical connexion of radiation, absorption, and conduction. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, 151, 1861. 1-36.

UNESCO. Scientific framework of world water balance: A contribution to the International Hydrological. **Technical Papers in Hydrology**, 7, 1971.

UNICEF. Child marriage on the rise in Horn of Africa as drought crisis intensifies, 2022. Disponível em: <https://www.unicef.org/press-releases/child-marriage-rise-horn-africa-drought-crisis-intensifies>. Acesso em: dez. 2024.

UNIVERSITY CORPORATION FOR ATMOSPHERIC RESEARCH - UCAR, 2025. Disponível em: <https://scied.ucar.edu/learning-zone/how-climate-works/energy-budget>. Acesso em: 13 abr. 2025.

US Drought Monitor, 2024. Disponível em: <https://droughtmonitor.unl.edu/About/AbouttheData/DroughtClassification.aspx>. Acesso em: dez. 2024.

- VENI, V. G. *et al.* Soil health and climate change. In: PRASAD, M. N. V.; PIETRZYKOWSKI, M. **Climate Change and Soil Interactions**. Amsterdam: Elsevier, 2020. p. 751–767.
- VIANA JÚNIOR, Mário M. **História Agrária, Migrações e Escravidão**. [S.l.]: Sertão Cult, 2020.
- VICENTE-SERRANO, S. M. . A. C. Performance of Drought Indices for Ecological, Agricultural, and Hydrological Applications. **Earth Interactions**, n. 16, 2012. 1–27.
- VICENTE-SERRANO, S. M.; BEGUERÍA, S.; LÓPEZ-MORENO, J. I. A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. **Journal of Climate**, n. 23, 2010. 1696-1718.
- VINS, H. *et al.* The Mental Health Outcomes of Drought: A Systematic Review and Causal Process Diagram. **Int. J. Environ. Res. Public Health**, 12, 2015. 13251-13275.
- VOSE, R. S. *et al.* Improved Historical Temperature and Precipitation Time Series for U.S. Climate Divisions. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, 53, n. 5, 2014. 1232-1251.
- WALLACE, John M.; HOBBS, Peter V. **Atmospheric science: an introductory survey**. 2. ed. San Diego: Academic Press, 2006.
- WALLACE-WELLS, D. **A terra inabitável: uma história do futuro**. São Paulo: Companhia das Letras, 2019.
- WANG, Q. Fixed-effect panel threshold model using Stata. **Stata Journal**, 15, n. 1, 2015. 121-134.
- WATTS, M. *et al.* The potential effects of climate change on subsistence farmers wellbeing in tropical (sub)montane homegardens. A case study on Mount Kilimanjaro. **Journal of Rural Studies**, 110, 2024.
- WILHITE, D. A.; GLANZ, M. H. Understanding the Drought Phenomenon: The Role of Definitions. **Water International**, 10, n. 3, 1985. 111-120.
- WILHITE, D. A.; SVOBODA, M. D.; HAYES, M. J. Understanding the complex impacts of drought: A key to enhancing drought mitigation and preparedness. **Water Resources Management**, 21, n. 5, 2007. 763–774.
- WMO. World Meteorological Organization, 2024. Disponível em: <https://community.wmo.int/en/activity-areas/climate-services/climate-products-and-initiatives/wmo-climatological-normals>.
- WMO. World Meteorological Organization, 2025. Disponível em: <https://wmo.int/topics/drought#:~:text=Drought%20is%20a%20prolonged%20dry,and%20population%20displacement%20and%20migration>. Acesso em: 12 jan. 2025.
- ZAVERI, E. D.; DAMANIA, R.; ENGLE, N. L. Droughts and Deficits-Summary Evidence of the Global Impact on Economic Growth. **Water Global Practice**, 2023.
- ZENG, N., & Y. J. Expansion of the world's deserts due to vegetation-albedo feedback under global warming. **Geophysical Research Letters**, 36, n. 17, 2009.

ZHANG, P. *et al.* Temperature effects on productivity and factor reallocation: Evidence from a half million chinese manufacturing plant. **Journal of Environmental Economics and Management**, 88, 2018. 1-17.

7. APÊNDICE

Tabela 15 – Efeitos de Longo Prazo da Mudança Climática na Taxa de Crescimento dos Principais indicadores econômicos para o Brasil (1999-2019) (continua)

		PIB <i>per capita</i>	Valor Adicionado Agropecuário
Rondônia	$\hat{\theta}_{\tilde{T}_{it}^+}$	0.059643	-0.7381725***
	$\hat{\theta}_{\tilde{T}_{it}^-}$	-14.9279	-4.085719**
	$\hat{\theta}_{\tilde{P}_{it}^+}$	-0.0005	-0.0001109
	$\hat{\theta}_{\tilde{P}_{it}^-}$	0.000679	0.000819*
Acre	$\hat{\theta}_{\tilde{T}_{it}^+}$	-0.07245	2.072038***
	$\hat{\theta}_{\tilde{T}_{it}^-}$	-1.67487**	10.40047***
	$\hat{\theta}_{\tilde{P}_{it}^+}$	-4.00E-06	0.0019918*
	$\hat{\theta}_{\tilde{P}_{it}^-}$	0.001048**	0.0024252
Amazonas	$\hat{\theta}_{\tilde{T}_{it}^+}$	-0.81303***	-2.460266***
	$\hat{\theta}_{\tilde{T}_{it}^-}$	-1.86988***	-3.510727***
	$\hat{\theta}_{\tilde{P}_{it}^+}$	-0.00034	-0.0014545**
	$\hat{\theta}_{\tilde{P}_{it}^-}$	0.000261	0.0006186
Roraima	$\hat{\theta}_{\tilde{T}_{it}^+}$	0.232262	-28.69029
	$\hat{\theta}_{\tilde{T}_{it}^-}$	0.059972	-26.68004
	$\hat{\theta}_{\tilde{P}_{it}^+}$	0.000126	-0.0622453
	$\hat{\theta}_{\tilde{P}_{it}^-}$	-0.00276	-0.0145866
Pará	$\hat{\theta}_{\tilde{T}_{it}^+}$	0.0655	-0.0664769
	$\hat{\theta}_{\tilde{T}_{it}^-}$	0.01405	-0.5022233
	$\hat{\theta}_{\tilde{P}_{it}^+}$	-8.90E-05	0.0001489
	$\hat{\theta}_{\tilde{P}_{it}^-}$	8.49E-05	0.0007957***
Amapá	$\hat{\theta}_{\tilde{T}_{it}^+}$	-0.49979	0.7958205
	$\hat{\theta}_{\tilde{T}_{it}^-}$	-3.76023**	-7.738666***
	$\hat{\theta}_{\tilde{P}_{it}^+}$	0.00063	0.0027202**
	$\hat{\theta}_{\tilde{P}_{it}^-}$	0.000659*	-0.0020413**
Tocantins	$\hat{\theta}_{\tilde{T}_{it}^+}$	-0.16062**	-0.8247166***
	$\hat{\theta}_{\tilde{T}_{it}^-}$	2.229529***	2.931903**
	$\hat{\theta}_{\tilde{P}_{it}^+}$	0.000519*	0.001081*
	$\hat{\theta}_{\tilde{P}_{it}^-}$	1.81E-05	0.0031442***
Maranhão	$\hat{\theta}_{\tilde{T}_{it}^+}$	-0.28544***	-0.7608017***
	$\hat{\theta}_{\tilde{T}_{it}^-}$	-0.2855*	-1.810409***
	$\hat{\theta}_{\tilde{P}_{it}^+}$	0.000201***	0.0005283***
	$\hat{\theta}_{\tilde{P}_{it}^-}$	0.000706***	0.0009919***

Tabela 14 - Efeitos de Longo Prazo da Mudança Climática na Taxa de Crescimento dos Principais indicadores econômicos para o Brasil (1999-2019) (continuação)

		PIB <i>per capita</i>	Valor Adicionado Agropecuário
Piauí	$\hat{\theta}_{\tilde{T}_{it}^+}$		-0.390351***
	$\hat{\theta}_{\tilde{T}_{it}^-}$	!	0.7753307***
	$\hat{\theta}_{\tilde{P}_{it}^+}$		-0.0005077***
	$\hat{\theta}_{\tilde{P}_{it}^-}$		0.0000652
Ceará	$\hat{\theta}_{\tilde{T}_{it}^+}$	-0.39738***	-0.1708986
	$\hat{\theta}_{\tilde{T}_{it}^-}$	0.130131***	0.294228***
	$\hat{\theta}_{\tilde{P}_{it}^+}$	-3.70E-05	-0.0002496**
	$\hat{\theta}_{\tilde{P}_{it}^-}$	0.000409***	-0.0008644***
Rio Grande do Norte	$\hat{\theta}_{\tilde{T}_{it}^+}$	-0.0346	-0.3995434*
	$\hat{\theta}_{\tilde{T}_{it}^-}$	0.548047***	0.3927553***
	$\hat{\theta}_{\tilde{P}_{it}^+}$	0.000371***	0.0001077
	$\hat{\theta}_{\tilde{P}_{it}^-}$	-6.90E-05	0.000311
Paraíba	$\hat{\theta}_{\tilde{T}_{it}^+}$	-0.43053***	-0.1766538
	$\hat{\theta}_{\tilde{T}_{it}^-}$	0.019731	0.6107151***
	$\hat{\theta}_{\tilde{P}_{it}^+}$	0.00018**	-0.0004941***
	$\hat{\theta}_{\tilde{P}_{it}^-}$	0.000774***	-0.000294*
Pernambuco	$\hat{\theta}_{\tilde{T}_{it}^+}$	-0.14839***	-0.411559***
	$\hat{\theta}_{\tilde{T}_{it}^-}$	0.163067*	0.8108919***
	$\hat{\theta}_{\tilde{P}_{it}^+}$	0.000207*	-0.0018583***
	$\hat{\theta}_{\tilde{P}_{it}^-}$	-0.00023**	-0.0021885***
Alagoas	$\hat{\theta}_{\tilde{T}_{it}^+}$	0.102921	0.9342897**
	$\hat{\theta}_{\tilde{T}_{it}^-}$	-0.3474*	-0.4548574
	$\hat{\theta}_{\tilde{P}_{it}^+}$	-0.00042**	-0.0028602***
	$\hat{\theta}_{\tilde{P}_{it}^-}$	0.001123***	0.0018047***
Sergipe	$\hat{\theta}_{\tilde{T}_{it}^+}$	-0.63654	-1.42785
	$\hat{\theta}_{\tilde{T}_{it}^-}$	-0.42611	-0.8493029
	$\hat{\theta}_{\tilde{P}_{it}^+}$	0.00379***	-0.0019959**
	$\hat{\theta}_{\tilde{P}_{it}^-}$	-0.00265***	-0.0081203***
Bahia	$\hat{\theta}_{\tilde{T}_{it}^+}$	-0.10671***	-0.2017944***
	$\hat{\theta}_{\tilde{T}_{it}^-}$	0.107164	0.3716016***
	$\hat{\theta}_{\tilde{P}_{it}^+}$	-0.00064***	-0.0007556***
	$\hat{\theta}_{\tilde{P}_{it}^-}$	-9.30E-05	0.0004338***

Tabela 14 - Efeitos de Longo Prazo da Mudança Climática na Taxa de Crescimento dos Principais indicadores econômicos para o Brasil (1999-2019) (continuação)

		PIB <i>per capita</i>	Valor Adicionado Agropecuário
Minas Gerais	$\hat{\theta}_{\tilde{T}_{it}^+}$	-0.291***	-0.398166***
	$\hat{\theta}_{\tilde{T}_{it}^-}$	0.223848***	1.260837***
	$\hat{\theta}_{\tilde{P}_{it}^+}$	0.000234***	0.00000914
	$\hat{\theta}_{\tilde{P}_{it}^-}$	-0.0002***	0.0000122
Espírito Santo	$\hat{\theta}_{\tilde{T}_{it}^+}$	-1.67002***	-0.2993826**
	$\hat{\theta}_{\tilde{T}_{it}^-}$	1.438011***	2.608411***
	$\hat{\theta}_{\tilde{P}_{it}^+}$	0.000652*	-0.0005281***
	$\hat{\theta}_{\tilde{P}_{it}^-}$	-0.00059	0.0001921
Rio de Janeiro	$\hat{\theta}_{\tilde{T}_{it}^+}$	-1.05577***	-0.0205861
	$\hat{\theta}_{\tilde{T}_{it}^-}$	2.588559***	1.561467***
	$\hat{\theta}_{\tilde{P}_{it}^+}$	0.001411***	-0.0004903
	$\hat{\theta}_{\tilde{P}_{it}^-}$	0.001686***	0.0019026***
São Paulo	$\hat{\theta}_{\tilde{T}_{it}^+}$	-0.19505***	0.0299662
	$\hat{\theta}_{\tilde{T}_{it}^-}$	0.229161**	-0.6870324***
	$\hat{\theta}_{\tilde{P}_{it}^+}$	9.23E-06	-0.0004197***
	$\hat{\theta}_{\tilde{P}_{it}^-}$	-0.00028***	-0.0002582***
Paraná	$\hat{\theta}_{\tilde{T}_{it}^+}$	0.32252***	0.7059403***
	$\hat{\theta}_{\tilde{T}_{it}^-}$	0.204772**	1.069525***
	$\hat{\theta}_{\tilde{P}_{it}^+}$	4.68E-05	-0.0001401
	$\hat{\theta}_{\tilde{P}_{it}^-}$	-0.00047***	-0.0008375***
Santa Catarina	$\hat{\theta}_{\tilde{T}_{it}^+}$	-0.53639***	0.1492059***
	$\hat{\theta}_{\tilde{T}_{it}^-}$	0.924387***	0.8771402***
	$\hat{\theta}_{\tilde{P}_{it}^+}$	-0.00017*	-0.0002741***
	$\hat{\theta}_{\tilde{P}_{it}^-}$	0.000139*	-0.0000322
Rio Grande do Sul	$\hat{\theta}_{\tilde{T}_{it}^+}$	0.163496***	0.6337482***
	$\hat{\theta}_{\tilde{T}_{it}^-}$	0.663158***	0.8520836***
	$\hat{\theta}_{\tilde{P}_{it}^+}$	-0.00031***	0.000695
	$\hat{\theta}_{\tilde{P}_{it}^-}$	-0.00022***	-0.0004447***
Mato Grosso do Sul	$\hat{\theta}_{\tilde{T}_{it}^+}$	-0.06242	0.1738394
	$\hat{\theta}_{\tilde{T}_{it}^-}$	-0.75083**	0.5191249
	$\hat{\theta}_{\tilde{P}_{it}^+}$	-0.00015	-0.0002359
	$\hat{\theta}_{\tilde{P}_{it}^-}$	-0.00043***	-0.0011973***

Tabela 14 - Efeitos de Longo Prazo da Mudança Climática na Taxa de Crescimento dos Principais indicadores econômicos para o Brasil (1999-2019) (conclusão)

		PIB <i>per capita</i>	Valor Adicionado Agropecuário
Mato Grosso	$\hat{\theta}_{\tilde{T}_{it}^+}$	-0.11595	-0.1872156
	$\hat{\theta}_{\tilde{T}_{it}^-}$	-0.43064	-3.743999**
	$\hat{\theta}_{\tilde{P}_{it}^+}$	0.0008***	0.0013319***
	$\hat{\theta}_{\tilde{P}_{it}^-}$	0.000437***	0.0006546**
Goiás	$\hat{\theta}_{\tilde{T}_{it}^+}$	-0.43353***	-1.395323***
	$\hat{\theta}_{\tilde{T}_{it}^-}$	-0.9337**	-1.386257***
	$\hat{\theta}_{\tilde{P}_{it}^+}$	0.000492**	0.0014606***
	$\hat{\theta}_{\tilde{P}_{it}^-}$	0.000199	0.0021084***

Nota (!) = Não apresentou convergência pois excedeu o número máximo de iterações do algoritmo.

*: significante a 10%; **: significante a 5%; ***: significante a 1%

Fonte: Elaborado pelo autor.