



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA

GIOVANNA RAMOS DE MEDEIROS ROCHA DOS SANTOS

PROJEÇÕES CLIMÁTICAS PARA O BRASIL A PARTIR DE MODELOS CMIP6

Rio de Janeiro

2026

GIOVANNA RAMOS DE MEDEIROS ROCHA DOS SANTOS

PROJEÇÕES CLIMÁTICAS PARA O BRASIL A PARTIR DE MODELOS CMIP6

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro como requisito para a obtenção parcial do título em bacharel em Geografia.

Orientadora: Profa. Dra. Claudine Pereira Dereczynski.

Rio de Janeiro

2026

CIP - Catalogação na Publicação

S237p Santos, Giovanna Ramos de Medeiros Rocha dos
Projeções Climáticas para o Brasil a partir de
modelos CMIP6 / Giovanna Ramos de Medeiros Rocha
dos Santos. -- Rio de Janeiro, 2026.
74 f.

Orientadora: Claudine Pereira Dereczynski.
Coorientadora: Anna Carolina Fernandes Bazzanela.
Trabalho de conclusão de curso (graduação) -
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto
de Geociências, Bacharel em Geografia, 2026.

1. Mudanças Climáticas. 2. Temperatura do Ar. 3.
Precipitação. I. Dereczynski, Claudine Pereira,
orient. II. Bazzanela, Anna Carolina Fernandes,
coorient. III. Título.

GIOVANNA RAMOS DE MEDEIROS ROCHA DOS SANTOS

PROJEÇÕES CLIMÁTICAS PARA O BRASIL A PARTIR DE MODELOS CMIP6

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao curso de Geografia da Universidade Federal
do Rio de Janeiro como requisito parcial para a
obtenção do título de bacharel em Geografia.

Aprovada em: 22/ 01 / 2026

BANCA EXAMINADORA



Profa. Dra. Claudine Pereira Dereczynski (Orientadora)
IGEO - Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

MSc. Anna Carolina Fernandes Bazzanela (Coorientadora)
Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, quero agradecer a Deus por conceder saúde aos meus queridos pais Marivaldo e Márcia que tanto me apoiaram e dedicaram suas vidas a fornecer todos os estímulos possíveis para que eu tivesse oportunidades de construir um futuro próspero. Sou grata a tudo que me ensinaram e proporcionaram até hoje.

Agradeço especialmente à minha orientadora Claudine Pereira Dereczynski e à minha coorientadora Anna Carolina Fernandes Bazzanela pela inesgotável paciência e por me guiarem neste processo. Tenho orgulho de ter trabalhado com duas pesquisadoras tão competentes e por quem tenho imenso respeito. A contribuição de vocês para esta realização acadêmica é uma honra para mim.

Muito obrigada aos meus amigos de longa data pela paciência, apoio, compreensão e carinho comigo antes e durante os anos de graduação. Vocês são a família que escolhi, e agradeço pelo privilégio que é participar da vida de cada um. Vocês me orgulham todos os dias, e saibam que torço para que alcancem tudo o que sonham. Não seria metade de quem sou se não tivesse aprendido tanto com vocês.

Também sou muito grata às amigas que conheci através da UFRJ e que fizeram esta jornada mais leve ao compartilhar risadas, angústias e conhecimento. Meu precioso Quarteto Fantástico, obrigada pelo companheirismo desde o BCMT até a Geografia. Cada minuto do tempo de qualidade que desfrutamos juntas é um presente que guardarei para sempre em meu coração. Vocês são especiais e desejo todo o sucesso do mundo para cada uma!

Meu agradecimento final é direcionado aos anos com que fui abençoada pela vida dos meus irmãos caninos Sadhan e Lyssa (ambos in memoriam), e ao tempo que ainda posso desfrutar com o Thor e seu jeitinho que aquece meu coração. Dedico meu esforço a eles como uma forma simplória de agradecer esses três anjos peludos pela companhia e lealdade, por serem capazes de me transbordar de amor e profunda felicidade, e por me proporcionarem uma sensação de equilíbrio mesmo em tempos difíceis. Vocês são meu porto seguro.

A todos e a todas, obrigada!

“Hoje, ainda almejamos saber por que estamos aqui e de onde viemos. O desejo profundo da humanidade pelo conhecimento é justificativa suficiente para nossa busca contínua”

(HAWKING, 1988).

RESUMO

O objetivo deste estudo é investigar as alterações nos padrões de temperatura do ar e precipitação até o fim do século XXI na América do Sul (AS), com foco nas regiões brasileiras. Dez modelos do *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6)* foram utilizados sob cenários de média (SSP2-4.5) e alta (SSP5-8.5) emissão de gases de efeito estufa. As mudanças para 2081-2100 em relação ao clima presente (1995-2014) indicam um clima mais seco no norte da AS (NSA) e no sudoeste da AS (SWS), e clima mais úmido no sudeste da AS (SES). Para as regiões brasileiras, também no final do século e sob cenário SSP5-8.5, projeta-se um clima mais seco ao longo do ano nas regiões Norte (N) e Nordeste (NE), sendo setembro e outubro os meses percentualmente mais secos (~50%). Nas demais regiões do Brasil, projeta-se aumento na precipitação na maior parte do ano, destacando-se: junho nas regiões Centro-Oeste (CO; +15%) e Sudeste (SE; +25%), maio e junho no Sul (S; em torno de +40%). No que concerne à mudança na temperatura, todos os modelos concordam com o aquecimento em toda a AS em ambos os prazos e cenários, principalmente no NSA e na região de monção da AS (SAM). Projeta-se para o Brasil no final do século e sob cenário SSP5-8.5 médias anuais acima de +5°C para as regiões N e CO do Brasil, e acima de +4°C para o N e SE, enquanto na Região S o aquecimento atinge 3°C. Ainda entre 2081-2100, sob o cenário SSP2-4.5, os meses mais quentes se distribuem entre o final do inverno e a primavera austral. Já sob cenário de alta emissão, o aquecimento mais drástico no país se concentra na primavera austral: em setembro para a Região S (acima de +4,5°C); outubro para as regiões N (acima de +6,5°C), CO (próximo de +7,5°C) e SE (+6°C); e novembro para o NE (+5°C).

Palavras-chave: Mudanças Climáticas. Temperatura do Ar. Precipitação.

ABSTRACT

The objective of this study is to investigate changes in air temperature and precipitation patterns until the end of the 21st century in South America (SA), focusing on the Brazilian regions. We use ten Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) models under the medium (SSP2-4.5) and high (SSP5-8.5) greenhouse gas emission scenarios. The changes for the 2081-2100 relative to the present climate (1995-2014) indicate a drier climate in northern SA (NSA) and southwestern SA (SWS), and a wetter climate in southeastern SA (SES). For Brazilian regions, also at the end of the century and under the SSP5-8.5 scenario, a drier climate is projected throughout the year in the Northern (N) and Northeastern (NE) regions, with September and October being the driest months in percentage terms (~-50%). In the other regions of Brazil, an increase in precipitation is projected for most of the year, notably: June in the Midwestern (CO; +15%) and Southeastern (SE; +25%) regions, and May and June in the Southern (S; around +40%). Regarding temperature change, all models agree on warming across the SA in both timeframes and scenarios, especially in the NSA and the South American Monsoon (SAM) region. By the end of the century, under the SSP5-8.5 scenario, annual averages above +5°C are projected for the N and CO regions and above +4°C for the NE and SE regions, while the S region will experience a warming of 3°C. Still between 2081-2100, the medians of the ensemble indicate that, under the SSP2-4.5 scenario, the hottest months are distributed between the end of austral winter and spring. Under the high emission scenario, the most drastic thermal changes in the country are concentrated in the austral spring: September for the S (above +4,5°C); October for the N (above +6,5°C), CO (close to +7,5°C), and SE (+6°C); and November for the NE (+5°C).

Keywords: Climate Change. Air Temperature. Precipitation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 – Precipitação média (mm/dia) proveniente do Climate Prediction Center (CPC) em sombreado, vento (m/s) em 850 hPa em vetores e linhas de corrente em 200 hPa (linhas vermelhas) do ERA5 para o período 1993-2016: (A) JJA e (B) DJF. A posição dos centros dos Anticiclones Subtropicais do Atlântico Sul (ASAS) e do Pacífico Sul (ASPS) estão demarcados em azul em ambas as estações do ano. Nos altos níveis, a posição da Alta da Bolívia (AB) e do cavado do Nordeste do Brasil (linha vermelha tracejada) aparecem em destaque na Figura 1B (DJF).....17
- Figura 2 – Mapa da América do Sul com as sete regiões estabelecidas pelo AR6 do IPCC (2021): NSA, NWS, NES, SAM, SES, SWS e SSA. As cinco regiões brasileiras são representadas pelas cores: verde (Região Norte), amarelo (Região Nordeste), marrom (Região Centro-Oeste), azul (Região Sudeste) e laranja (Região Sul).....29
- Figura 3 - Mudança na precipitação (%) para o período 2041-2060, em relação a 1995-2014, para: (A) janeiro sob cenário SSP2-4.5; (B) julho sob cenário SSP2-4.5; (C) anual sob cenário SSP2-4.5; (D) janeiro sob cenário SSP5-8.5; (E) julho sob cenário SSP5-8.5; e (F) anual sob cenário SSP5-8.5. As áreas coloridas, sem hachurado (/), exibidas na coluna à direita representam uma concordância superior a 70% sobre o sinal da mudança.....32
- Figura 4 - Mudança na precipitação (%) para o período 2081-2100, em relação a 1995-2014, para: (A) janeiro sob cenário SSP2-4.5; (B) julho sob cenário SSP2-4.5; (C) anual sob cenário SSP2-4.5; (D) janeiro sob cenário SSP5-8.5; (E) julho sob cenário SSP5-8.5; e (F) anual sob cenário SSP5-8.5. As áreas coloridas, sem hachurado (/), exibidas na coluna à direita representam uma concordância superior a 70% sobre o sinal da mudança.....33
- Figura 5 - Boxplots mensais da mudança na precipitação (%) na Região Norte do Brasil para longo prazo (2081-2100) em relação ao período histórico (1995–2014), sob o cenário SSP2-4.5 (laranja) e SSP5-8.5 (vermelho). As caixas representam a variabilidade entre os 10 modelos do conjunto TOP10-CMIP6-AS. Os limites da caixa indicam o primeiro e terceiro quartis, a linha central na caixa representa a mediana dos modelos, e os extremos correspondem aos valores mínimos e máximos (sem considerar outliers). A linha cinza grossa no eixo y (0% de mudança) tem o intuito de facilitar a visualização e análise dos boxplots.....36

- Figura 6 - Boxplots mensais da mudança na precipitação (%) na Região Nordeste do Brasil para longo prazo (2081-2100) em relação ao período histórico (1995–2014), sob o cenário SSP2-4.5 (laranja) e SSP5-8.5 (vermelho). As caixas representam a variabilidade entre os 10 modelos do conjunto TOP10-CMIP6-AS. Os limites da caixa indicam o primeiro e terceiro quartis, a linha central na caixa representa a mediana dos modelos, e os extremos correspondem aos valores mínimos e máximos (sem considerar outliers). A linha cinza grossa no eixo y (0% de mudança) tem o intuito de facilitar a visualização e análise dos boxplots.....38
- Figura 7 - Boxplots mensais da mudança na precipitação (%) na Região Centro-Oeste do Brasil para longo prazo (2081-2100) em relação ao período histórico (1995–2014), sob o cenário SSP2-4.5 (laranja) e SSP5-8.5 (vermelho). As caixas representam a variabilidade entre os 10 modelos do conjunto TOP10-CMIP6-AS. Os limites da caixa indicam o primeiro e terceiro quartis, a linha central na caixa representa a mediana dos modelos, e os extremos correspondem aos valores mínimos e máximos (sem considerar outliers). A linha cinza grossa no eixo y (0% de mudança) tem o intuito de facilitar a visualização e análise dos boxplots.....39
- Figura 8 - Boxplots mensais da mudança na precipitação (%) na Região Sudeste do Brasil para longo prazo (2081-2100) em relação ao período histórico (1995–2014), sob o cenário SSP2-4.5 (laranja) e SSP5-8.5 (vermelho). As caixas representam a variabilidade entre os 10 modelos do conjunto TOP10-CMIP6-AS. Os limites da caixa indicam o primeiro e terceiro quartis, a linha central na caixa representa a mediana dos modelos, e os extremos correspondem aos valores mínimos e máximos (sem considerar outliers). A linha cinza grossa no eixo y (0% de mudança) tem o intuito de facilitar a visualização e análise dos boxplots.....41
- Figura 9 - Boxplots mensais da mudança na precipitação (%) na Região Sul do Brasil para longo prazo (2081-2100) em relação ao período histórico (1995–2014), sob o cenário SSP2-4.5 (laranja) e SSP5-8.5 (vermelho). As caixas representam a variabilidade entre os 10 modelos do conjunto TOP10-CMIP6-AS. Os limites da caixa indicam o primeiro e terceiro quartis, a linha central na caixa representa a mediana dos modelos, e os extremos correspondem aos valores mínimos e máximos (sem considerar outliers). A linha cinza grossa no eixo y (0% de mudança) tem o intuito de facilitar a visualização e análise dos boxplots.....43
- Figura 10 - Mudança na temperatura média do ar (°C) para o período 2041-2060, em relação a 1995-2014, para: (A) janeiro sob cenário SSP2-4.5; (B) julho sob

cenário SSP2-4.5; (C) anual sob cenário SSP2-4.5; (D) janeiro sob cenário SSP5-8.5; (E) julho sob cenário SSP5-8.5; e (F) anual sob cenário SSP5-8.5. As áreas coloridas, sem hachurado (/), exibidas na coluna à direita representam uma concordância superior a 70% sobre o sinal da mudança.....44

Figura 11 - Mudança na temperatura média do ar (°C) para o período 2081-2100, em relação a 1995-2014, para: (A) janeiro sob cenário SSP2-4.5; (B) julho sob cenário SSP2-4.5; (C) anual sob cenário SSP2-4.5; (D) janeiro sob cenário SSP5-8.5; (E) julho sob cenário SSP5-8.5; e (F) anual sob cenário SSP5-8.5. As áreas coloridas, sem hachurado (/), exibidas na coluna à direita representam uma concordância superior a 70% sobre o sinal da mudança.....45

Figura 12 - Boxplots mensais da mudança da temperatura média (°C) na Região Norte para longo prazo (2081–2100) em relação ao período histórico de 1995–2014, segundo o SSP2-4.5 (laranja) e SSP5-8.5 (vermelho). As caixas representam a variabilidade entre os 10 modelos do conjunto TOP10-CMIP6-AS. Os limites da caixa indicam o primeiro e terceiro quartis, a linha central na caixa representa a mediana dos modelos, e os extremos correspondem aos valores mínimos e máximos (sem considerar outliers).....47

Figura 13 - Boxplots mensais da mudança da temperatura média (°C) na Região Nordeste para longo prazo (2081–2100) em relação ao período histórico de 1995–2014, segundo o SSP2-4.5 (laranja) e SSP5-8.5 (vermelho). As caixas representam a variabilidade entre os 10 modelos do conjunto TOP10-CMIP6-AS. Os limites da caixa indicam o primeiro e terceiro quartis, a linha central na caixa representa a mediana dos modelos, e os extremos correspondem aos valores mínimos e máximos (sem considerar outliers).....49

Figura 14 - Boxplots mensais da mudança da temperatura média (°C) na Região Centro-Oeste para longo prazo (2081–2100) em relação ao período histórico de 1995–2014, segundo o SSP2-4.5 (laranja) e SSP5-8.5 (vermelho). Os limites da caixa indicam o primeiro e terceiro quartis, a linha central na caixa representa a mediana dos modelos, e os extremos correspondem aos valores mínimos e máximos (sem considerar outliers).....50

- Figura 15 - Boxplots mensais da mudança da temperatura média (°C) na Região Sudeste para longo prazo (2081–2100) em relação ao período histórico de 1995–2014, segundo o SSP2-4.5 (laranja) e SSP5-8.5 (vermelho). Os limites da caixa indicam o primeiro e terceiro quartis, a linha central na caixa representa a mediana dos modelos, e os extremos correspondem aos valores mínimos e máximos (sem considerar outliers).....51
- Figura 16 - Boxplots mensais da mudança da temperatura média (°C) na Região Sul para longo prazo (2081–2100) em relação ao período histórico de 1995–2014, segundo o SSP2-4.5 (laranja) e SSP5-8.5 (vermelho). Os limites da caixa indicam o primeiro e terceiro quartis, a linha central na caixa representa a mediana dos modelos, e os extremos correspondem aos valores mínimos e máximos (sem considerar outliers).....53
- Figura 17 - Resumo do comportamento das mudanças mais relevantes projetadas pelo conjunto TOP10-CMIP6-AS para temperatura e precipitação entre 2081 e 2100 sob cenário SSP5-8.5. No mapa, as áreas estão coloridas de acordo com a intensidade (alta, média ou baixa) do aquecimento, e os valores contidos na legenda correspondem às médias anuais das regiões brasileiras. O símbolo de nuvem verde (marrom) demonstra aumento (redução) na precipitação para cada região baseado no sinal da mudança que predomina ao longo do ano. Os valores contidos nas nuvens representam as medianas mensais expostas nos boxplots regionais, juntamente com os meses que apresentam menos (topo) e mais (base) chuva.....55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Modelos do CMIP6 utilizados para o estudo.....	28
Tabela A.1 - Dados da mudança na precipitação total, em %, projetada pelos modelos do TOP10-CMIP6-AS para as regiões Norte, Nordeste, Centro-Oeste, Sudeste e Sul, respectivamente, entre 2081-2100. As informações em negrito correspondem aos valores mínimo e máximo encontrados para determinado cenário e mês, e que estão associados à alta variabilidade do conjunto.....	62
Tabela B.1 - Mudança na precipitação (%) média mensal dos períodos 2041-2060 e 2081-2100, relativo ao período 1995-2014, sob cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 para as regiões Norte, Nordeste, Centro-Oeste, Sudeste e Sul do Brasil.....	65
Tabela C.1 - Dados da mudança na temperatura média do ar, em °C, projetada pelos modelos do TOP10-CMIP6-AS para as regiões Norte, Nordeste, Centro-Oeste e Sul, respectivamente, entre 2081-2100. As informações em negrito correspondem aos valores mínimo e máximo encontrados para determinado cenário e mês e que estão associados à alta variabilidade do conjunto.....	67
Tabela D.1 - Mudança na temperatura do ar (°C) média mensal dos períodos 2041-2060 e 2081-2100, relativo ao período 1995-2014, sob cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 para as regiões Norte, Nordeste, Centro-Oeste, Sudeste e Sul do Brasil.....	70

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AB	Alta da Bolívia
ALB	Amazônia Legal Brasileira
AR6	Sixth Assessment Report
AS	América do Sul
ASAS	Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul
ASPS	Anticiclone Subtropical do Pacífico Sul
CMIP6	Coupled Model Intercomparison Project phase 6
CO	Centro-Oeste do Brasil
CPC	Climate Prediction Center
DJF	Dezembro-Janeiro-Fevereiro
ENOS	El Niño Oscilação Sul
GEEs	Gases de Efeito Estufa
GWLs	Global Warming Levels
HighResMIP	High Resolution Model Intercomparison Project
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
JJA	Julho-Junho-Agosto
MAM	Março-Abril-Maio
N	Norte do Brasil
NE	Nordeste do Brasil
NES	Nordeste da América do Sul
NSA	Norte da América do Sul
NWS	Noroeste da América do Sul

PNA	Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima
PRECIS	Providing Regional Climates for Impacts Studies
RCP	Representative Concentration Pathways
S	Sul do Brasil
SAM	Monção da América do Sul
SE	Sudeste do Brasil
SES	Sudeste da América do Sul
SMAS	Sistema de Monção da América do Sul
SON	Setembro-Outubro-Novembro
SSA	Sul da América do Sul
SSPs	Shared Socio-Economic Pathways
SWS	Sudoeste da América do Sul
VCN	Vórtice Ciclônico do Nordeste
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
2	REVISÃO DA LITERATURA	16
2.1	Clima Presente.....	16
2.2	Projeções Climáticas.....	19
2.2.1	Projeções para Mudanças na Precipitação na América do Sul e Brasil.....	19
2.2.2	Projeções para a Mudança na Temperatura para a América do Sul e Brasil.....	23
3	DADOS E METODOLOGIA	27
3.1	Dados.....	27
3.2	Metodologia.....	30
4	RESULTADOS	32
4.1	Mudança Percentual na Precipitação Total na América do Sul.....	32
4.2	Mudança Percentual na Precipitação Total no Brasil.....	35
4.2.1	Região Norte do Brasil.....	35
4.2.2	Região Nordeste do Brasil.....	37
4.2.3	Região Centro-Oeste do Brasil.....	38
4.2.4	Região Sudeste do Brasil.....	40
4.2.5	Região Sul do Brasil.....	41
4.3	Mudança na Temperatura Média do Ar na América do Sul.....	43
4.4	Mudança na Temperatura Média do Ar no Brasil.....	46
4.4.1	Região Norte do Brasil.....	47
4.4.2	Região Nordeste do Brasil.....	48
4.4.3	Região Centro-Oeste do Brasil.....	49

4.4.4	Região Sudeste do Brasil.....	51
4.4.5	Região Sul do Brasil.....	52
5	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	54
	REFERÊNCIAS	57
	APÊNDICE A – MUDANÇA NA PRECIPITAÇÃO PROJETADA INDIVIDUALMENTE PARA AS REGIÕES DO BRASIL.....	62
	APÊNDICE B – MUDANÇA PERCENTUAL NA PRECIPITAÇÃO TOTAL PROJETADA PELO CONJUNTO PARA AS REGIÕES DO BRASIL.....	65
	APÊNDICE C - MUDANÇA NA TEMPERATURA MÉDIA PROJETADA INDIVIDUALMENTE PARA AS REGIÕES DO BRASIL.....	67
	APÊNDICE D - MUDANÇA NA TEMPERATURA MÉDIA PROJETADA PELO CONJUNTO PARA AS REGIÕES DO BRASIL.....	70

1 INTRODUÇÃO

As atividades antrópicas são apontadas pela comunidade científica como as principais responsáveis pelo aquecimento global, já afetando extremos de tempo e clima em diversas regiões do globo (IPCC, 2021). Desta forma, a demanda por estudos que envolvem projeções de mudanças climáticas é contínua, principalmente em territórios vulneráveis nos aspectos socioeconômico e ambiental, como é o caso do Hemisfério Sul (Santos; Wakimoto; Nery, 2025). O continente sul-americano tende a ser fortemente impactado pela mudança climática. Considerando-se níveis de aquecimento global (*Global Warming Levels* - GWLs), o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change* - IPCC) projeta aquecimento igual ou superior em toda a América do Sul (AS), exceto no Sul da AS (Gutiérrez *et al.*, 2021).

As projeções climáticas, destacadas pelo IPCC em seus periódicos relatórios de avaliação, são fundamentais para estabelecer metas governamentais baseadas nas variações dos indicadores de temperatura, precipitação e nível do mar. Estas projeções então possibilitam qualificar e quantificar as transformações no clima no planeta, e assim impulsionam os compromissos da agenda internacional para com a questão ambiental.

É fundamental que os estudos acompanhem a atualização do *Coupled Model Intercomparison Project* (CMIP - Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados) e dos relatórios de avaliação do IPCC, o que permite uma evolução na investigação dos efeitos das mudanças climáticas. Os avanços na modelagem climática, disponibilizados pelo CMIP6, viabilizam projeções mais recentes e com maior precisão. Devido à necessidade de projetar a intensidade das mudanças climáticas perante governanças ambientalmente responsáveis, pesquisas constantemente atualizadas são capazes de fundamentar as políticas ambientais em vigor para assegurar um planejamento urbano e rural baseado no clima futuro do Brasil e suas consequências. As alterações climáticas, como aumento na temperatura média do ar e mudanças na precipitação, ocasionam adversidades que requerem medidas de prevenção e contenção, a exemplo de problemas de saúde causados pelo calor extremo, queimadas, secas, chuvas intensas, enchentes e outros.

Este estudo tem como objetivo analisar as mudanças projetadas na temperatura do ar e na precipitação até o final do século na AS, com foco nas cinco regiões do país: Norte (N), Nordeste (NE), Centro-Oeste (CO), Sudeste (SE) e Sul (S) do Brasil. As regiões detalhadas da AS correspondem às áreas estabelecidas pelo AR6 do IPCC: Norte (NSA), Nordeste (NES), Noroeste (NWS), Região de Monção da América do Sul (SAM), Sudeste (SES), Sudoeste

(SWS) e Sul (SSA). O clima futuro (entre 2041 e 2100) é analisado por um conjunto de dez modelos climáticos globais do CMIP6, sendo composto pelos modelos que, segundo Bazzanella *et al.* (2024), apresentam melhor desempenho na América do Sul (TOP10-CMIP6-AS), e sob dois cenários denominados SSPs (*Shared Socio-Economic Pathways* - Caminhos Socioeconômicos Compartilhados; SSP2-4.5 e SSP5-8.5).

Após esta introdução, discorre-se no Capítulo 2 sobre os aspectos do clima presente na AS e Brasil, e sobre os demais trabalhos que abordam as projeções climáticas para estes dois recortes espaciais. Em seguida, o Capítulo 3 aborda a obtenção e manipulação dos dados utilizados no estudo, bem como a metodologia utilizada. Ao passo que o Capítulo 4 reúne os resultados das projeções para todo o continente, assim como discute as mudanças na temperatura e precipitação nas regiões brasileiras. Por fim, o Capítulo 5 apresenta o conteúdo de forma sintetizada a fim de analisar a associação dos resultados apresentados com outros estudos mencionados ao longo do Capítulo 2.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Clima Presente

A América do Sul se localiza entre os oceanos Pacífico (a oeste) e Atlântico (a leste), e é composta por 13 países, sendo o Brasil aquele que possui a maior extensão territorial com uma área de 8.510.417,822 km² (IBGE, 2023). O clima da AS apresenta características tropicais, subtropicais e extratropicais (Satyamurty; Nobre; Silva Dias, 1998). Uma característica geográfica marcante desse continente é a presença da estreita Cordilheira dos Andes, com seu relevo íngreme, estendendo-se pela costa oeste, desde o norte até o sul da América do Sul.

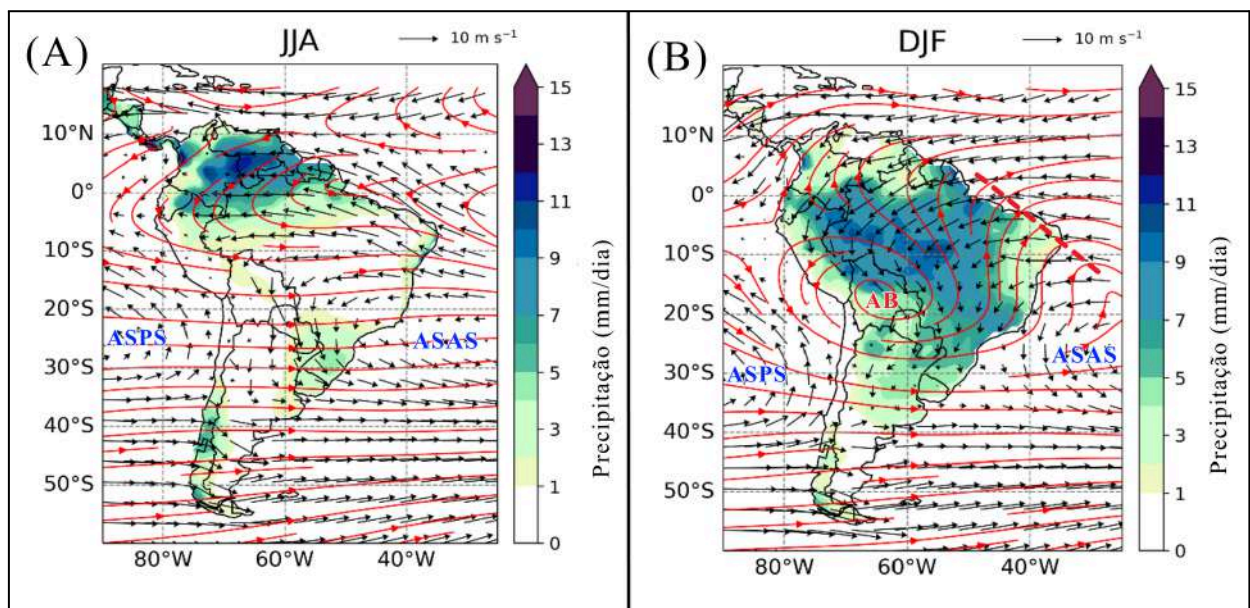
O continente sofre influência da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), próximo a linha do Equador, e da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), durante o verão austral, além dos anticiclones subtropicais do Atlântico Sul (ASAS) e do Pacífico Sul (ASPS) que atuam durante todo o ano (Reboita *et al.*, 2015).

Com relação aos sistemas transientes, as frentes frias são os sistemas meteorológicos mais frequentes. De acordo com Oliveira (1986), passam em torno de 110 frentes por ano no sul da América do Sul (entre 40°S e 45°S) e apenas 28 ao norte de 20°S. A passagem de ciclones extratropicais pelo continente afeta o clima da AS. Gan e Rao (1991) identificaram dois centros de máxima ocorrência de ciclones no continente sul-americano: o primeiro no Golfo de São Matias, com máximo no verão; e o segundo sobre o Uruguai, cujo máximo ocorre no inverno. Considerando todo o continente, Gan e Rao (1991) contabilizaram em média 109 ciclones anualmente, sendo o máximo em maio (13 ciclones) e o mínimo em dezembro (7 ciclones).

A Figura 1, extraída de Ferreira e Reboita (2022), exibe para o inverno e verão, a precipitação proveniente do *Climate Prediction Center* (CPC) e a circulação nos baixos (850 hPa) e altos (250 hPa) níveis da troposfera. Observa-se que a precipitação intra-anual tem distribuição variada, o que impossibilita uma definição espacialmente padronizada para estações secas e úmidas para toda a AS (Almazroui *et al.*, 2021). Durante o inverno austral (Figura 1A) há concentração da chuva no norte e sudoeste do continente sul-americano e também no sul do Brasil, enquanto outras áreas apresentam um baixo volume pluviométrico (como as porções central e nordeste do Brasil, norte do Chile e Argentina, por exemplo). Já no verão austral (Figura 1B), nota-se um clima mais úmido em grande parte da AS, com exceção do sul da Argentina. Satyamurty, Nobre e Silva Dias (1998) citam o grande volume de chuva

na região da Amazônia e arredores, o que também pode ser visualizado na Figura 1B. Observa-se também nos baixos níveis, a presença do ASPS e do ASAS em ambas as estações do ano. O ASAS localiza-se mais ao norte e adentra o continente no inverno, e mais ao sul e afastado do continente no verão. Nos altos níveis, as linhas de corrente exibem um padrão predominante de ventos oeste ao sul de 10°S e uma crista é configurada entre 10°S e 10°N no inverno (Figura 1A). Durante o verão, observa-se nos altos níveis a presença da Alta da Bolívia (AB) e do cavado do Nordeste do Brasil, representado pela linha tracejada vermelha (Figura 1B).

Figura 1 - Precipitação média (mm/dia) proveniente do Climate Prediction Center (CPC) em sombreado, vento (m/s) em 850 hPa em vetores e linhas de corrente em 200 hPa (linhas vermelhas) do ERA5 para o período 1993-2016: (A) JJA e (B) DJF. A posição dos centros dos Anticiclones Subtropicais do Atlântico Sul (ASAS) e do Pacífico Sul (ASPS) estão demarcados em azul em ambas as estações do ano. Nos altos níveis, a posição da Alta da Bolívia (AB) e do cavado do Nordeste do Brasil (linha vermelha tracejada) aparecem em destaque na Figura 1B (DJF).



Fonte: Adaptado de Ferreira e Reboita (2022).

A temperatura na AS varia em razão da extensão meridional do continente, sendo também influenciada pela maritimidade, pelas diferentes altitudes (como a Cordilheira dos Andes), e por fenômenos meteorológicos (Garreud *et al.*, 2009). Eidt (1969) também menciona a ausência de condições extremas de temperatura no território sul-americano. Assim, as maiores temperaturas médias são encontradas nas áreas de clima tropical, como o Nordeste do Brasil, e as temperaturas mais baixas são apresentadas ao sul da AS (Collins; Chaves; Marques, 2009).

No Brasil, o clima tropical (tipo A, segundo a classificação de Köppen) ocorre em 81% do território em razão de poucas áreas apresentarem fatores que são considerados limitantes e que poderiam induzir outras zonas climáticas, como altitude e precipitação (Alvares *et al.*, 2014). Os verões são bem úmidos e os invernos mais secos em razão do ciclo anual da precipitação no país, como resultado do Sistema de Monção da América do Sul (SMAS) (Ferreira e Reboita, 2022).

A Região N do Brasil, apesar das altas temperaturas, conta com chuvas bem distribuídas ao longo do ano. Já a Região NE é a que apresenta a maior variação espacial do clima no país, podendo ser equatorial, semi-árido e tropical. A Região CO tem um regime de chuvas responsável por abastecer o Pantanal Mato-Grossense, e seu clima é tropical semi-úmido. Na Região SE, o clima é tropical com as estações facilmente diferenciadas em pontos mais altos, como na região Serrana do estado do Rio de Janeiro, enquanto a Região S está sob influência do clima subtropical, e com ocorrência de geadas no inverno (BRASIL, 2022).

Em relação à variabilidade interanual da precipitação e da temperatura do ar, padrões de teleconexão, como por exemplo o fenômeno El Niño Oscilação Sul (ENOS), interferem no clima do país. Durante eventos El Niño intensos pode ocorrer redução da precipitação no leste do N e no NE, e aumento da precipitação no S. O inverso ocorre durante os eventos La Niña (Grimm, 2009). Estes fenômenos de interação entre atmosfera e oceano também alteram a temperatura média global durante seu período de atividade no Oceano Pacífico (Siqueira, 2012).

Em certos anos, a chegada do inverno no Brasil e, conseqüentemente da baixa umidade, favorece incêndios florestais, principalmente na porção central do território, sendo registrados os períodos mais secos entre maio e setembro. Além disso, a ocorrência de geada em alguns estados brasileiros durante o inverno, como Rio Grande do Sul e São Paulo, é estimulada pelas massas de ar frio com baixas temperaturas e alta pressão superficial (Satyamurty; Nobre; Silva Dias, 1998).

Como apontado por Nobre *et al.* (2016), o desflorestamento em larga escala afeta o clima local e, simultaneamente, as mudanças climáticas regionais intensificam os efeitos da perda de vegetação nativa. Satyamurty, Nobre e Silva Dias (1998) afirmam que o aumento da temperatura e a redução no regime de chuva estão entre as conseqüências do desmatamento para uma região de grande biodiversidade como a Amazônia. Os pesquisadores também chamam atenção para o fato de que, como a evapotranspiração é fundamental para a manutenção da umidade local, é preciso determinar os impactos das alterações climáticas no

ciclo hidrológico da região por intermédio de estudos mais complexos que envolvam experimentos em distintas áreas.

2.2 Projeções Climáticas

As projeções climáticas, obtidas com modelos globais e regionais cujos resultados variam de acordo com a diferentes cenários de emissões, contribuem para a formulação de políticas públicas de adaptação e mitigação das mudanças climáticas. Sob este viés, serão apresentados estudos voltados para a investigação dos impactos do aquecimento global sobre os regimes de temperatura do ar e precipitação no continente sul-americano.

Salienta-se que os trabalhos descritos nas subseções 2.2.1 e 2.2.2 utilizam conjuntos (ensemble) com diferentes modelos ao invés da análise de suas simulações individuais. Isto se define como uma estratégia para reduzir o grau de imprecisão ocasionado pela variabilidade climática e pelo nível de desempenho de cada modelo em distintas áreas (Oliveira *et al.*, 2023). Ademais, os resultados dos modelos do CMIP6 se mostram mais satisfatórios do que as versões anteriores do CMIP, por diversas razões, incluindo a maior resolução espacial de tais modelos, como destacado por Medeiros, Oliveira e Avila-Diaz (2022) a partir das contribuições de Bock *et al.* (2020).

2.2.1 Projeções para a Mudança na Precipitação na América do Sul e Brasil

As projeções de mudanças na precipitação não são homogêneas em toda a AS. Há poucas regiões onde os membros dos conjuntos dos modelos climáticos concordam com o sinal da mudança na precipitação e poucas áreas onde a mudança é estatisticamente significativa. Ademais, os resultados devem ser analisados com cautela pois dependendo se a mudança é dada em percentual ou em milímetros, os resultados podem ser distintos. Por exemplo, analisando-se a projeção da mudança na quantidade de precipitação durante o inverno numa região onde o clima é predominantemente seco nessa época do ano, percentualmente, o valor da mudança pode ser muito grande, mas de fato a quantidade de chuva em mm/mês pode ser baixa.

Da Silva, Da Rocha, e Nunes (2025) utilizaram modelos do *High Resolution Model Intercomparison Project* (HighResMIP) para projetar as condições de precipitação (mm/dia) no futuro (2015-2050) e em relação ao presente (1979-2014) sobre a AS. Os resultados apresentam um agravamento no período de seca da porção central do continente sul-americano associado à redução superior a 30% na precipitação. As mudanças

pluviométricas mais drásticas para a AS são projetadas para o inverno e primavera austrais, e a redução no regime de chuvas é indicada para ambas as estações. Especificamente no inverno austral, o clima mais seco atinge, principalmente, a América Central, Bacia Amazônica e o setor NSA do continente sul-americano. Por último, os autores reiteram a dificuldade em simular corretamente a precipitação na área de atuação da ZCIT e a evapotranspiração na Amazônia.

Almazroui *et al.* (2021) utilizaram dados de um conjunto do CMIP6, composto por mais de 30 modelos, no futuro (2040-2099) na AS. As projeções para as mudanças na precipitação (mensal e anual em mm/dia) variam de acordo com os cenários SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5. Os resultados incluem a redução da precipitação na Amazônia e nos Andes do sul do Chile, e o aumento das chuvas no setor SES da AS. Além disso, os autores afirmam que os meses mais chuvosos oferecem maior contribuição para o aumento da média pluviométrica anual da AS.

Torres *et al.* (2021) utilizaram as saídas de 26 modelos globais do CMIP5, sob os cenários *Representative Concentration Pathways* (RCP 2.6, 4.5, 6.0 e 8.5), para estudar as alterações na precipitação (mm/ano) da AS entre 2006 e 2100, considerando como período histórico 1861-1890. Em condições de aquecimento global entre 1,5°C e 2°C, projeta-se uma redução nas chuvas para o CO e SE do país, enquanto no S e no norte da Região NE aponta-se um aumento de cerca de 100 mm/ano. Os autores também mencionam que a diminuição da precipitação pode alcançar até 150 mm/ano no extremo norte da AS.

Ortega *et al.* (2021) analisaram as projeções sazonais de 49 modelos CMIP5 e 33 modelos CMIP6 entre 2071 e 2100 (considerando como clima presente o período 1971-2000), e sob cenários RCP 8.5 e SSP5-8.5. Para a região do Chaco, Mesoamerica, centro do Chile, Hotspot dos Andes Tropicais, e Cerrado é projetado um aumento de até 9 mm/dia na estação mais chuvosa, e entre 2 e 4 mm/dia durante o período mais seco.

Outro trabalho que investigou a mudança na precipitação acumulada (em mm) sob cenário RCP 8.5 foi o de Bambach *et al.* (2021). A metodologia envolve a comparação entre o projetado para o futuro (2030-2099) e o presente (1985-2014), primeiramente para a AS e então com foco no território chileno. Em seus resultados, os autores citam que para o verão austral as projeções exibem clima mais seco nos setores NWS e SWS da AS, e aumento pluviométrico na Região NE do Brasil e na Bacia Platina. Para o inverno austral, foi projetada uma tendência ao clima mais seco durante o inverno austral para o sul do Chile e outras áreas do NES da AS. A respeito da diferente interpretação dos dados a partir da métrica utilizada, Bambach *et al.* (2021) comparam as projeções do volume pluviométrico acumulado para a AS

tanto em mm quanto em percentual. Assim, nota-se que, entre 2070-2099, o sul do Chile mostra clima mais seco (com diminuição na precipitação entre 80 e 200 mm, correspondendo a uma mudança de até -75%) em conjunto com a porção norte do continente (onde a alteração pode ultrapassar os -300 mm, o que representaria uma redução de até 100%). Já o clima mais úmido é majoritariamente encontrado no litoral do setor NWS da AS (com aumento podendo ultrapassar os 300 mm, e a mudança em até +75%), e nas regiões CO e SE do Brasil (alteração entre +60 e +200 mm, com aumento que varia entre 10% e 50%). Em linhas gerais, as projeções para o verão austral mostram compatibilidade espacial com relação ao sinal da mudança na precipitação, embora para o inverno austral o mesmo apenas ocorra de forma mais evidente no sul do Chile, e nos setores NSA e SES da AS.

Avila-Diaz *et al.* (2023) analisaram as saídas dos modelos do HighResMIP para a América Latina e Caribe entre 2021 e 2050 sob o cenário SSP5-8.5. Para as alterações na precipitação, os autores indicam o aumento nos setores NWS e SES da AS (acima de +10%). Esta mudança no regime de chuvas do setor NWS é influenciada pela projeção de mudanças na configuração da ZCIT que mostram seu estreitamento e concentração da precipitação. Em contrapartida, nos setores SWS, SSA e SAM projeta-se um clima mais seco.

No trabalho de Marengo *et al.* (2023), as mudanças climáticas foram observadas na AS, de forma geral, mas também com atenção especial para os biomas brasileiros. A redução da precipitação no leste da porção norte dos Andes e na região da Amazônia é mencionada nos resultados, bem como o clima mais úmido no SES e norte dos Andes.

O estudo de Byrne *et al.* (2018) trata das alterações nas médias pluviométricas anuais correlacionadas com a localização e intensidade da ZCIT. Para isso, os cientistas utilizaram 32 modelos do CMIP5, sob cenário RCP 8.5, para projetar o clima futuro (2079-2098) em relação ao observado entre 1985 e 2004. Os autores então mencionam o estreitamento da ZCIT perante o aquecimento da superfície, o que também está associado com a diminuição na quantidade de massa transportada.

Especificamente com relação ao Brasil, o Ministério do Meio Ambiente (MMA) realizou um estudo com a finalidade de embasar as metas do Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima (PNA). O modelo regional Eta foi utilizado para projetar o clima futuro do país entre 2011 e 2100 sob cenários RCP 4.5 e 8.5, considerando como período de referência 1961-2005. A mudança na precipitação foi observada em mm/dia para o verão e o inverno austrais, e entre os resultados destaca-se o aumento pluviométrico até o fim do século XXI na Região Sul, principalmente durante o verão. As projeções também assinalam maior duração do clima seco nas regiões Norte e Nordeste (BRASIL, 2016).

Correa *et al.* (2022) utilizaram 40 modelos do CMIP6 para examinar as projeções para a precipitação média mensal (mm/dia) para os estados brasileiros entre 1985 e 2014. Na Região Norte, alguns estados apresentaram redução pluviométrica enquanto em outros foi projetado clima úmido. O clima mais seco é projetado em todos os estados das regiões Centro-Oeste e Nordeste, e o aumento na precipitação predomina em toda a Região Sul. Já na Região Sudeste, projeta-se diminuição pluviométrica para os estados de São Paulo e Minas Gerais, e clima mais úmido para os estados litorâneos da região (Rio de Janeiro e Espírito Santo).

Em Reboita *et al.* (2022), os autores utilizaram modelos regionais aninhados aos modelos CMIP5 sob cenário RCP 8.5 para estudar o comportamento dos extremos de precipitação diária (mm/dia) para a AS no futuro (2020-2099) em relação ao clima presente (1995-2014). Os resultados apresentados incluem o aumento no regime de chuvas para a Bacia do Rio da Prata e na Região Sudeste do Brasil. Os autores atestam que as mudanças são mais evidentes ao fim do século, e que o aumento na intensidade e na frequência de ocorrência dos eventos extremos por toda AS é iminente para as próximas décadas.

Bozkurt *et al.* (2018) examinaram os extremos de precipitação nas bacias andinas na porção central do Chile por meio de modelos CMIP5 sob cenários RCP 2.6 e 8.5 para o clima futuro (2010-2099) em relação ao período histórico 1960-2005. Conforme o projetado para a área de estudo, a precipitação sofrerá uma redução de até 10% entre 2010 e 2039, e de 30% ao fim do século nas bacias andinas. Os autores notaram uma tendência de alteração no ciclo hidrológico, especialmente para três das bacias, o que teria impacto direto na quantidade de chuva tanto para os períodos secos quanto para os úmidos, o que agravaria as secas, por exemplo. A combinação entre as mudanças no ciclo da precipitação e os dados sobre uso e cobertura do solo fornecem embasamento para investigações a respeito dos impactos nos ecossistemas, assim como ajuda a explicar o aumento na ocorrência de incêndios florestais.

Medeiros, Oliveira e Avila-Diaz (2022) utilizaram as projeções de modelos do CMIP3 (sob cenário A2), CMIP5 (sob cenário RCP 8.5) e CMIP6 (sob cenário SSP5-8.5) nas regiões brasileiras para o clima futuro (2046-2100) em relação ao período 1981-2000. Embora os resultados mostrem que nenhum dos 40 modelos apresenta alto nível de desempenho para todas as regiões do Brasil, há consenso entre o projetado para os índices de extremos climáticos de precipitação. Os autores preveem que os eventos extremos associados aos regimes de chuva em território brasileiro sofrerão um agravamento na intensidade e um aumento na frequência e duração.

As regiões Sudeste e Sul do Brasil são citadas como as mais vulneráveis à desastres de caráter hidromeeteorológicos por Marengo *et al.* (2021) devido às projeções de aumento nas chuvas extremas. O estudo associa as mudanças nos extremos de precipitação ao risco de aumento na frequência e intensidade desses eventos. Na metodologia foram usadas projeções do HadGEM3A-GA3.0 (modelo considerado “pré-CMIP6”) até 2100, em relação a 1870-1899, sob 3 níveis de aquecimento global (1,5 °C, 2°C e 4°C). Há relação diretamente proporcional entre o aumento do nível de aquecimento e a magnitude da alteração pluviométrica. Isto é, sob aumento de 4 °C da temperatura global projetam-se mudanças mais drásticas e que ocasionam consequências mais acentuadas. Na porção oeste do Brasil, por exemplo, projeta-se aumento na ocorrência de eventos extremos pluviométricos de curto prazo. Os autores notaram que, embora alguns modelos discordem entre si, o sul do território brasileiro está entre as áreas que podem ser atingidas por enchentes repentinas perante o aumento das chuvas intensas na região.

De acordo com Bazzanela (2025), projeta-se um clima mais seco nos setores nordeste e sul da Amazônia Legal Brasileira (ALB), e aumento na intensidade da precipitação extrema para o setor noroeste. O estudo usou modelos CMIP6 sob cenário SSP5-8.5 para investigar os extremos climáticos para o clima futuro (2041-2060 e 2081-2100) da ALB em relação a 1995-2014. Outrossim, nas porções sul e leste da ALB projeta-se clima mais seco, enquanto no setor oeste projeta-se um aumento na precipitação entre 75 e 100 mm/ano.

2.2.2 Projeções para a Mudança na Temperatura na América do Sul e Brasil

As projeções de mudanças na temperatura do ar sobre a AS exibem um padrão mais homogêneo do que as mudanças na precipitação. De forma geral, o aumento na temperatura é estatisticamente significativo e segue um gradiente norte-sul, com maiores aumentos no norte do que no sul da AS (Torres *et al.*, 2021; Marengo *et al.*, 2023; Almazroui *et al.*, 2021; Ortega *et al.*, 2021; Moraes, Wanderley e Delgado, 2023). O aumento é maior no final do século (2081-2100) e considerando os cenários mais pessimistas, por exemplo o SSP5-8.5. Almazroui *et al.* (2021) mostram que o aumento da temperatura é mais pronunciado nos meses mais quentes do ano, chegando a uma diferença de 3°C e isso ocorre nas regiões onde há projeção de redução na precipitação. Com relação aos extremos de temperatura, alguns estudos mostram que o aumento da frequência de ocorrência dos extremos quentes é maior do que a redução da frequência dos extremos frios (Collazo, Barrucand e Rusticucci, 2023; Marengo *et al.*, 2023; Monteiro dos Santos *et al.*, 2024).

Almazroui *et al.* (2021) afirmam, a partir de projeções de modelos CMIP6 para 2040-2099 em relação ao período histórico 1995-2014, que o aquecimento se torna mais drástico à medida que aproxima-se do fim do século. A performance dos modelos sob os cenários SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5 demonstram que o aumento na temperatura (°C) está condicionado à progressão do cenário de menor forçante para o de maior forçante. A título de exemplo, os setores NSA e SAM apresentaram maior aquecimento mesmo sob o SSP1-2.6 (alteração até +1,5°C) ao fim do século, e sob cenário de alta emissão (SSP5-8.5) a mudança ultrapassa os +5°C. Os autores afirmam que mesmo com o controle da emissão de gases de efeito estufa (GEEs), mudanças na temperatura e seus impactos ainda serão registrados nas próximas décadas.

Na pesquisa de Torres *et al.* (2021), modelos CMIP5 foram usados para investigar as mudanças na temperatura (°C) da AS de 2006 até o fim do século, tendo como período de referência 1861-1890. Entre os resultados, observa-se que o conjunto projetou um aumento de pelo menos 0,5°C para grande parte da AS sob aquecimento global de 1,5°C ou 2°C. Os autores também mencionam que a concentração espacial do aumento na temperatura é projetada para os setores NSA e SAM do continente sul-americano, impactando principalmente a Região CO e parte dos Andes.

O trabalho de Ortega *et al.* (2021) investigou as mudanças na temperatura (°C) da América Central e do Sul para o fim do século XXI (2071-2100) através das projeções de um conjunto de modelos CMIP5 e um conjunto CMIP6 sob cenários de alta emissão (RCP 8.5 e SSP5 8.5). A avaliação prévia das simulações dos modelos mostrou, através dos coeficientes de correlação entre o observado e o projetado, bom desempenho para a Mesoamerica, o bioma Chaco e a porção central do Chile. Como parte da avaliação do clima presente, está o aquecimento superestimado por grande parte do conjunto CMIP6 na parte central do Chile durante o verão austral, simultaneamente nota-se que alguns modelos do conjunto também superestimam as temperaturas no inverno austral. Segundo os autores, as projeções do CMIP6 são consistentes entre si ao indicar o aquecimento da superfície desde o período histórico, e esse aumento pode alcançar os 6°C até 2100.

As mudanças na frequência e intensidade das ondas de calor na AS, entre 2065-2100 em relação a 1979-2014, são investigadas por Collazo, Barrucand e Rusticucci (2023). Os resultados apresentados incluem o aumento na frequência de eventos de seca e calor por toda a AS sob cenário SSP2-4.5, enquanto sob o SSP5-8.5 o aumento na ocorrência destes eventos é apontado na AS extratropical. A Amazônia, por exemplo, pode sofrer com ondas de calor de maior duração em razão do clima mais seco projetado para o futuro. Ademais, os modelos

concordam pouco com as alterações na intensidade das ondas de calor projetadas para o Brasil e o setor SSA da AS em ambos os cenários.

Marengo *et al.* (2023) estudaram as tendências anuais nas alterações climáticas na AS, entre 1961 e 2021, considerando quatro níveis de aquecimento ao invés de observar as mudanças por década. Os modelos do CMIP6, sob nível de aquecimento global de 1,5°C, projetam um aumento na temperatura de quase 0,7°C para os setores NSA, NES, SES e SAM. Para estas mesmas áreas sob aquecimento global de 4°C, projeta-se um aumento entre 2,9 e 4,2°C. Aliás, o setor SAM apresentou um aumento da temperatura mais drástico do que nas demais regiões da AS.

O estudo do PNA (BRASIL, 2016) analisou as projeções do modelo Eta para as mudanças na temperatura (°C) para o verão e inverno austrais entre 2011 e 2100 em comparação com o clima presente (1991-2005), e sob cenários RCP 4.5 e 8.5. A Região CO apresenta aquecimento nas duas estações, e com maior intensidade entre 2071 e 2100, seguida pela Região N. O documento esclarece que o aumento na temperatura é mais drástico em simulações associadas com o modelo climático global HadGEM2-ES.

Segundo Marengo *et al.* (2009), as alterações na temperatura média do ar são reflexo do aumento nas temperaturas máximas e mínimas observadas. Para a metodologia, os autores consideraram o clima futuro entre 2071 e 2100 em relação ao clima presente (1961-1990), e os modelos regionais do *Providing Regional Climates for Impacts Studies* (PRECIS) sob cenários A2 e B2. Estes modelos projetaram um aquecimento entre 3°C e 4°C na região amazônica, e entre 1°C e 4°C na Região NE do Brasil. No entanto, os autores notaram baixa capacidade de simular a variabilidade sazonal da temperatura para as regiões S e CO.

No trabalho de Correa *et al.* (2022), a mudança na temperatura do ar (°C) foi simulada por um conjunto de modelos CMIP6 para todo o território brasileiro no período histórico de 1985-2014. Os autores ressaltaram um bom desempenho dos modelos nas regiões Sudeste e Sul a partir da realização de testes estatísticos. Contudo, notou-se que o conjunto superestimou um pouco o aquecimento na Região S, e subestimou a temperatura na Região N. De forma geral, o conjunto projetou aumento na temperatura em todos os estados brasileiros para o período estudado, a exemplo do Mato Grosso e Mato Grosso do Sul com mudança de +1°C.

Moraes, Wanderley e Delgado (2023) utilizaram modelos CMIP6, sob os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, para projetar alterações no clima entre 2021 e 2100, com o intuito de investigar as áreas suscetíveis à desertificação no Brasil com relação ao observado em 1990-2018. Os modelos projetam aquecimento entre 3°C e 6°C para o território brasileiro no

fim do século sob ambos os cenários. As regiões N, NE e CO são as que mais aquecem, o que afetaria a floresta amazônica, por exemplo. O aumento na temperatura, o desmatamento, a agricultura intensiva, e a expansão das regiões sob clima sub-úmido demonstram que as mudanças climáticas induzem à aridez e, conseqüentemente, ao aumento das áreas brasileiras consideradas altamente suscetíveis à desertificação (a exemplo do norte do estado de Minas Gerais). Os autores apontam que os impactos na Caatinga podem ser ocasionados pelo agravamento da aridez na Região NE. Em contrapartida, os climas úmido e subúmido, como os das regiões Norte e Sul, impedem a propensão à desertificação destas áreas.

Para Nobre *et al.* (2016), a combinação entre o aumento da temperatura do ar e o desmatamento impacta severamente a biodiversidade amazônica. Os autores utilizaram um conjunto de modelos CMIP5, sob cenários RCP 2.6, 4.5 e 8.5, para projetar as mudanças climáticas na região da Amazônia, entre 2015 e 2059 em relação ao período histórico (1961-1990). As projeções do CMIP5 incluem um aquecimento entre 2,5°C e 6°C na AS, atingindo principalmente o interior do continente. Para a Amazônia, o drástico e rápido aumento na temperatura durante o período seco significa um desequilíbrio no ecossistema que precisou de milhões de anos para se adaptar às alterações nas condições climáticas.

3 DADOS E METODOLOGIA

3.1 Dados

Apenas dados do CMIP6 são utilizados neste trabalho. Estes dados são divididos em clima presente (histórico) e clima futuro (projeções), e foram obtidos a partir do sítio do *World Climate Research Programme* (<https://esgf-ui.ceda.ac.uk/cog/search/cmip6-ceda/>).

Os dados do clima presente provêm do *All-Forcing Simulation of the Recent Past* (ou histórico), na qual se impõe condições de mudanças observadas durante o passado recente (1850-2014). Esse passado recente considera o período pré-industrial para que haja um controle entre as perturbações climáticas antes e depois da industrialização. Salienta-se que, para esta pesquisa, o recorte temporal utilizado para o clima de referência compreende o período de 1995 a 2014.

As simulações do CMIP6 histórico então combinam forçantes que provêm de causas naturais e antrópicas. O histórico é imprescindível para o funcionamento dos modelos, já que são usados como referência e controle para garantir consistência na modelagem climática, em virtude da tendência vulnerável das projeções perante os dados registrados (Eyring *et al.*, 2016).

Os dados do clima futuro são gerados por intermédio de um processo de modelagem que precisa incluir cenários em conformidade com as condições anteriores e atuais dos níveis de emissão de GEEs e forçamento radiativo. Tais cenários, denominados SSPs, são responsáveis por projetar possíveis realidades com enfoque na emissão de poluentes (como o CO₂) perante a carência ou implantação de estratégias para mitigação das mudanças climáticas. A presente pesquisa foca nas projeções sob os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5. De acordo com Riahi *et al.* (2017), o SSP2-4.5 é um cenário de média emissão de GEEs que considera um nível intermediário de desafios que envolvem as ações de mitigação e adaptação às mudanças climáticas. Já o SSP5-8.5 é uma combinação entre maior tendência de ações para a adaptação e grandes obstáculos para as políticas de mitigação, além de ser um cenário de alta emissão em razão do uso desenfreado dos combustíveis fósseis. O cenário SSP5-8.5 foi escolhido pois, de acordo com Almazroui *et al.* (2021), a mudança na precipitação projetada só é maior do que a variabilidade climática do presente nesse cenário. Por outro lado, o SSP2-4.5 foi selecionado para efeito de comparação com o SSP5-8.5 e por ser um cenário intermediário dentre os cinco cenários disponíveis no CMIP6. Para as projeções, considera-se o período 2041-2060 como médio prazo e 2081-2100 como longo prazo.

A pré-seleção dos modelos foi baseada em Bazzanella *et al.* (2024), que avaliaram individualmente o desempenho de um conjunto de modelos CMIP6 sobre a AS, além de selecionar os modelos que apresentaram a melhor performance para representar o clima na AS. A partir disto, foram usados os seguintes critérios para utilização desses modelos neste trabalho: (i) dados disponíveis para as variáveis precipitação e temperatura média; (ii) dados mensais disponíveis entre 2041 a 2100 para os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5; (iii) dados mensais disponíveis entre 1995 a 2014 para o histórico de cada um dos modelos; (iv) resolução original entre 100 e 250 km. Tendo em vista o bom desempenho desses modelos no clima presente e o cumprimento dos requisitos, dez modelos (Tabela 1) foram selecionados para o presente estudo, sendo eles: ACCESS-ESM1-5; CMCC-ESM2; CNRM-ESM2-1; EC-EARTH3; INM-CM5-0; KACE-1-0-G; MIROC6; MPI-ESM1-2-HR; MRI-ESM2-0 e TaiESM1. Doravante, esse conjunto de modelos é denominado de TOP10-CMIP6-AS. Maiores informações sobre o Projeto CMIP6 são encontradas em <https://es-doc.org/cmip6/>.

Tabela 1 - Modelos do CMIP6 utilizados para o estudo.

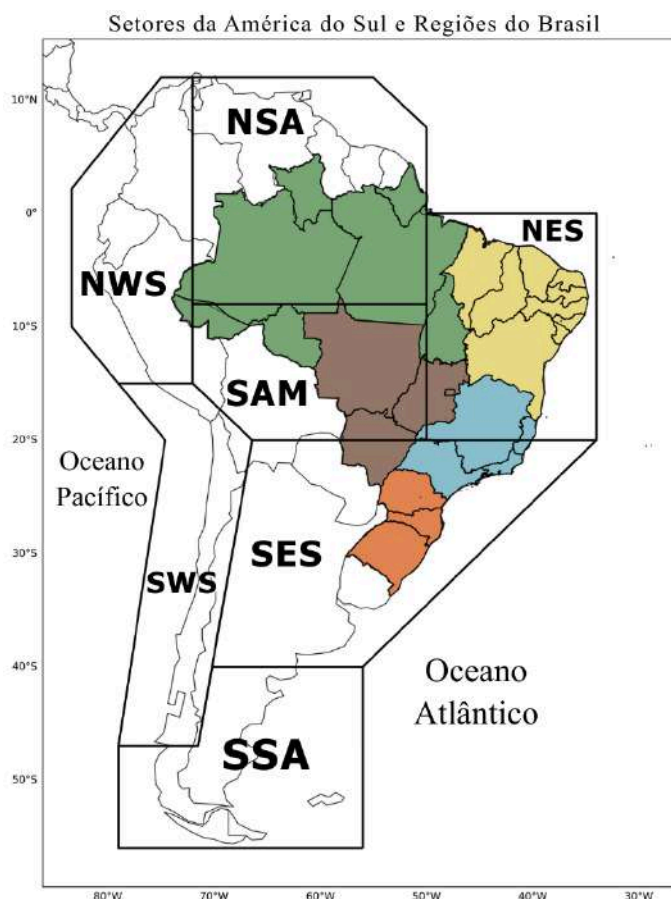
<i>Modelo</i>	<i>País/Região</i>	<i>Instituição</i>	<i>Resolução Horizontal Original</i>	<i>Membro do Conjunto</i>
ACCESS-ESM1-5	Austrália	CSIRO Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation	250 km	r1i1p1f1
CMCC-ESM2	Itália	CMCC Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici	100 km	r1i1p1f1
CNRM-ESM2-1	França	CNRM e CERFACS Centre National de Recherches Météorologiques e CERFACS Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique	250 km	r1i1p1f2
EC-EARTH3	Europa	EC-Earth consortium	100 km	r1i1p1f1
INM-CM5-0	Rússia	INM Institute for Numerical Mathematics	100 km	r1i1p1f1
KACE-1-0-G	Coreia	NIMS-KMA National Institute of Meteorological Sciences, Korea Meteorological Administration	250 km	r1i1p1f1
MIROC6	Japão	MIROC consortium JAMSTEC, AORI, NIES, R-CCS	250 km	r1i1p1f1

MPI-ESM1-2-HR	Alemanha	MPI-M Max Planck Institute for Meteorology	100 km	r1i1p1f1
MRI-ESM2-0	Japão	MRI Meteorological Research Institute	100 km	r1i1p1f1
TaiESM1.0	Tailândia	AS-RCEC Research center for environmental changes, academia sinica	100 km	r1i1p1f1

Fonte: Autoria própria (2025).

As projeções descritas neste trabalho foram elaboradas para as sete regiões do continente sul-americano e os principais resultados foram direcionados para as macrorregiões brasileiras (ver Figura 2). Outrossim, considera-se a estação do verão austral como o trimestre Dezembro-Janeiro-Fevereiro (DJF), outono austral como Março-Abril-Maio (MAM), inverno austral como Junho-Julho-Agosto (JJA) e primavera austral como Setembro-Outubro-Novembro (SON).

Figura 2 - Mapa da América do Sul com as sete regiões estabelecidas pelo AR6 do IPCC (2021): NSA, NWS, NES, SAM, SES, SWS e SSA. As cinco regiões brasileiras são representadas pelas cores: verde (Região Norte), amarelo (Região Nordeste), marrom (Região Centro-Oeste), azul (Região Sudeste) e laranja (Região Sul).



Fonte: Autoria própria (2025).

3.2 Metodologia

As projeções de mudança na temperatura do ar são apresentadas em graus Celsius (°C), enquanto as mudanças na precipitação estão em percentual (%). Em razão da resolução horizontal do conjunto TOP10-CMIP6-AS apresentar uma variação entre 100 e 250 km, optou-se por igualar a resolução dos dados dos modelos para 250 km utilizando o método bilinear de interpolação. Esta modificação determina uma quantidade aproximada de pontos de grade por setor da AS: 55 no setor NWS; 72 no setor NSA; 48 no setor NES; 45 no setor SAM; 104 no setor SES; 65 no setor SWS; e 54 no setor SSA. Ao passo que as regiões brasileiras apresentam a seguinte quantidade de pontos de grade: 54 pontos de grade na Região N; 18 na Região NE; 22 na Região CO; 13 na Região SE; e 9 na Região S. Então, esta etapa do estudo segue a recomendação do Atlas do IPCC (versão AR6) e trabalhos como Giorgi e Mearns (2022), os quais ressaltam que para obter um maior nível de confiança na utilização dos dados é necessário haver um limiar suficiente de pontos de grade para assegurar representatividade estatística regional nos dados climáticos analisados.

Para cada um dos modelos e para cada um dos cenários, as mudanças nas variáveis são computadas fazendo-se a média no futuro (2041-2060 ou 2081-2100) e subtraindo-se da média do presente (1995-2014), considerando os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5.

Nos mapas anuais de algumas figuras, as áreas coloridas, sem hachuramento (/), indicam regiões onde o conjunto dos modelos exibe concordância maior do que 70%, ou seja, pelo menos 7 modelos concordam com o sinal da mudança. Para tal, compara-se o sinal da mudança indicado individualmente por cada modelo para cada ponto de grade do mapa.

Ademais, realiza-se um tratamento estatístico a fim de expressar a variabilidade e dispersão das projeções individuais dos modelos para os doze meses do ano e para as cinco regiões, sob os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 para o período 2081-2100, através de boxplots. Estes visam fundamentar a discussão a respeito da incerteza das projeções globais, pois há divergência de resultados em decorrência das representações aproximadas de cada modelo para o sistema e os processos terrestres (Canadian Centre for Climate Services, 2023).

Os resultados de algumas projeções individuais dos modelos para a mudança na precipitação entre 2081-2100 são apresentados no Apêndice A. Já o Apêndice B agrupa as mudanças na precipitação projetadas pelo conjunto sob ambos os cenários e prazos. Os dados das projeções individuais de certos modelos para a mudança na temperatura do ar ao fim do século são exibidos no Apêndice C. Enquanto o Apêndice D reúne as mudanças na

temperatura projetadas pelo TOP10-CMIP6-AS para as cinco regiões brasileiras sob ambos os cenários entre 2041-2100.

Assim, os modelos que ocasionam a grande variabilidade do conjunto em certos meses e regiões do Brasil são citados ao longo do Capítulo 4 e expostos nos Apêndices A e C. A variabilidade intermodelos é ocasionada pelo contraste na magnitude das mudanças projetadas e pela divergência em relação ao sinal da mudança. Considera-se também o cálculo das médias mensais e anuais para as cinco regiões brasileiras separadamente com a intenção de observar a variação da temperatura do ar e precipitação no país a médio (2041-2060) e longo (2081-2100) prazos e em ambos os cenários (SSP2-4.5 e SSP5-8.5), o que pode ser visualizado nos Apêndices B e D.

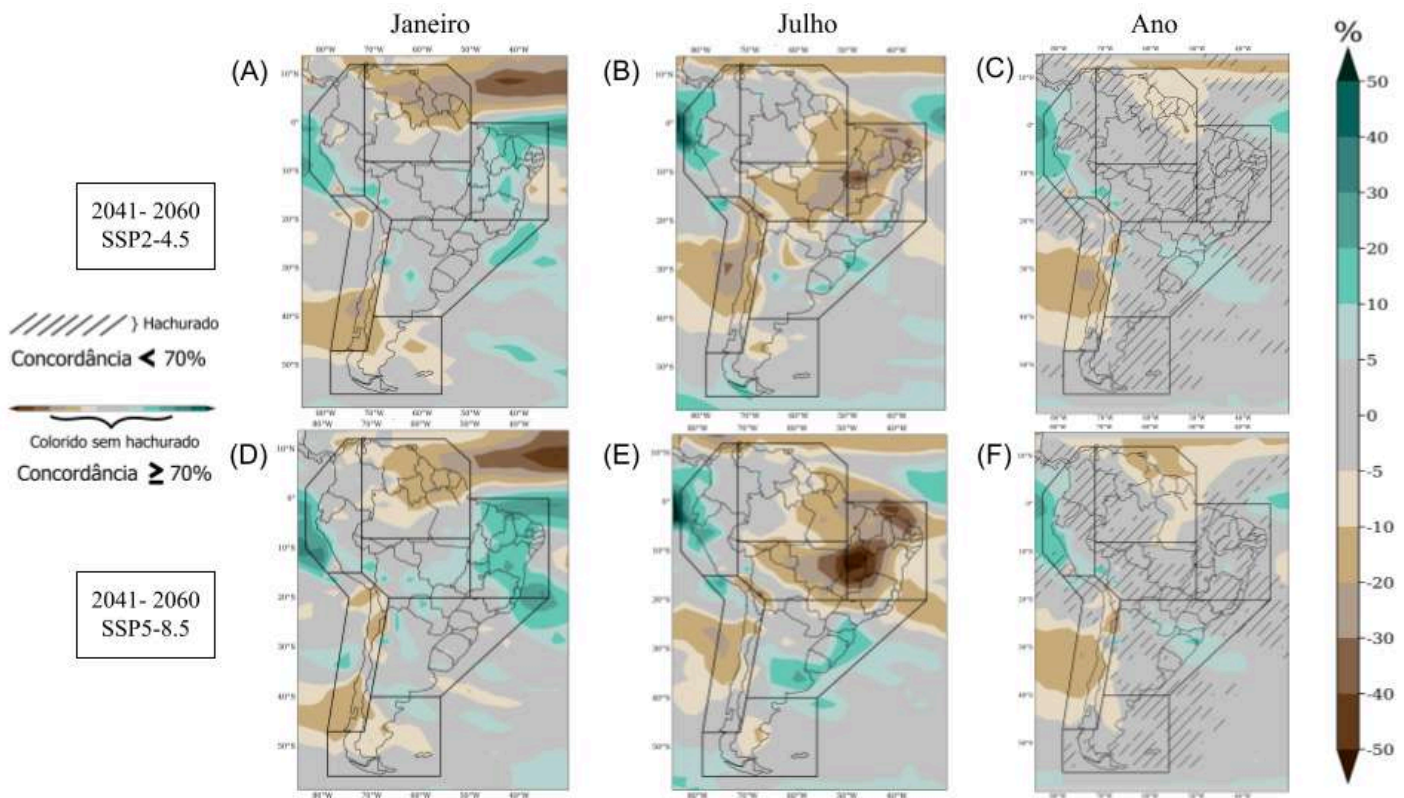
Por último, é devido esclarecer que todas as etapas supradescritas para tratamento estatístico foram conduzidas pela linguagem de programação Python, versão 3.9.19 (PYTHON SOFTWARE FOUNDATION, 2024).

4 RESULTADOS

4.1 Mudança Percentual na Precipitação Total na América do Sul

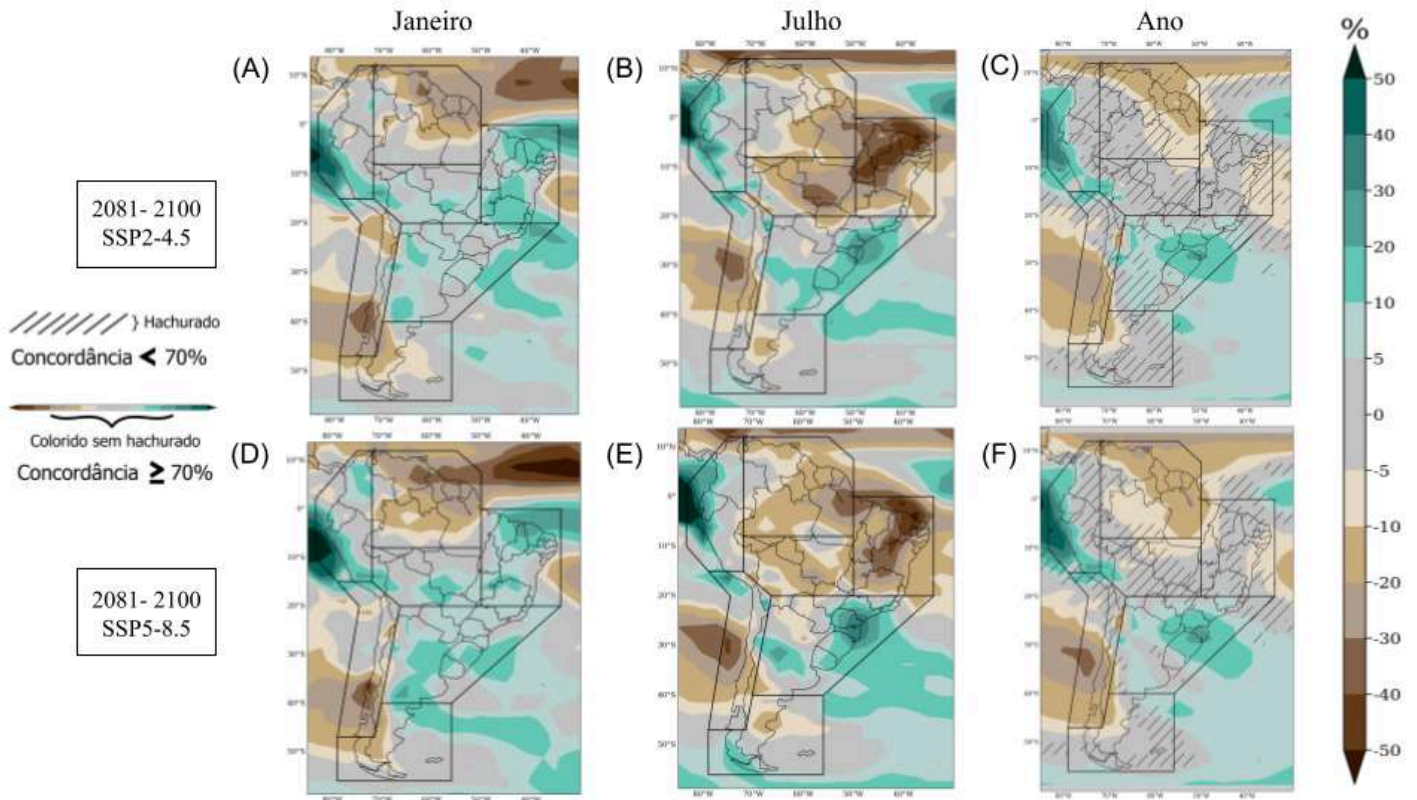
Este subcapítulo discorre sobre as mudanças na precipitação total, em percentual, projetadas pelo conjunto de dez modelos CMIP6 para a América do Sul. A Figura 3 e a Figura 4 apresentam as mudanças, em relação ao clima presente (1995-2014) em janeiro, julho e anual no médio termo (2041-2060) e no longo termo (2081-2100), respectivamente. Em ambas as figuras são apresentadas as mudanças sob o cenário SSP2-4.5 (SSP5-8.5) no painel superior (painel inferior). As figuras das mudanças no ano (Figuras 3C, 3F e 4C, 4F) incluem a concordância entre os modelos, onde a área colorida sem hachurados (/) indica regiões onde 70% dos modelos (7 modelos) ou mais concordam com o sinal da mudança na precipitação total.

Figura 3 - Mudança na precipitação (%) para o período 2041-2060, em relação a 1995-2014, para: (A) janeiro sob cenário SSP2-4.5; (B) julho sob cenário SSP2-4.5; (C) anual sob cenário SSP2-4.5; (D) janeiro sob cenário SSP5-8.5; (E) julho sob cenário SSP5-8.5; e (F) anual sob cenário SSP5-8.5. As áreas coloridas, sem hachurado (/), exibidas na coluna à direita representam uma concordância superior a 70% sobre o sinal da mudança.



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 4 - Mudança na precipitação (%) para o período 2081-2100, em relação a 1995-2014, para: (A) janeiro sob cenário SSP2-4.5; (B) julho sob cenário SSP2-4.5; (C) anual sob cenário SSP2-4.5; (D) janeiro sob cenário SSP5-8.5; (E) julho sob cenário SSP5-8.5; e (F) anual sob cenário SSP5-8.5. As áreas coloridas, sem hachurado (/), exibidas na coluna à direita representam uma concordância superior a 70% sobre o sinal da mudança.



Fonte: Autoria própria (2025).

Comparando-se os mapas apresentados nas Figuras 3 e 4, observa-se que as maiores mudanças e em áreas mais abrangentes são projetadas para o final do século e sob cenário SSP5-8.5 (Figuras 4D, 4E e 4F). Ademais, nos mapas anuais (Figuras 3C, 3F, 4C e 4F) nota-se que em poucas regiões há concordância de sinal entre os modelos, destacando-se o aumento da precipitação no SES e no NWS, e a redução da precipitação no NSA e no SWS.

A projeção de clima mais úmido para o SES e onde há concordância entre os modelos (Figuras 3C, 3F, 4C e 4F), abrangendo o S do Brasil, nordeste da Argentina, Paraguai e Uruguai, também é indicada nos estudos de Almazroui *et al.* (2021), Avila-Diaz *et al.* (2023), Marengo *et al.* (2021), Ortega *et al.* (2021), Da Silva, Da Rocha, e Nunes (2025), e Torres *et al.* (2021). Assim como também ressaltado em Da Silva, Da Rocha, e Nunes (2025), a contribuição percentual para aumento da precipitação anual no SES é maior no inverno austral (julho) do que no verão austral (janeiro). Na Região S do Brasil projeta-se uma mudança, a médio prazo, entre +5% e +10% no leste do setor SES para ambos os cenários (Figuras 3C e

3F). Entre 2081 e 2100, sob ambos os cenários (Figuras 4C e 4F) projeta-se aumento entre 20% e 30% na Região S do Brasil. Destaca-se que o aumento na precipitação total anual já se observa no clima presente a uma taxa de 90 mm/década (Regoto *et al.*, 2021), e é também destacado nas projeções elaboradas por outros cientistas usando distintos cenários e modelos (Marengo *et al.*, 2023; Medeiros, Oliveira e Avila-Diaz, 2022; Torres *et al.*, 2021).

No setor NWS, o aumento percentual da precipitação atinge principalmente o oeste do Peru. Esse aumento está relacionado ao estreitamento e intensificação da ZCIT, já detectado no clima presente e também projetado para o futuro associado ao aquecimento global (Byrne *et al.*, 2018; Ortega *et al.*, 2021). A projeção do conjunto para 2041-2060 (Figuras 3C e 3F) oscila entre 10% e 20% em ambos os cenários, ao passo que um aumento entre 20% e 30% é projetado para o final do século, em ambos os cenários (Figuras 4C e 4F). Nota-se que o núcleo de máximo aumento da precipitação acompanha o deslocamento da ZCIT, posicionando-se mais a sul em janeiro e mais a norte em julho.

Com relação à redução da precipitação no NSA, esta atinge uma pequena área no norte do setor, onde há concordância entre os modelos em 2041-2060 (Figuras 3C e 3F). Por outro lado, no final do século (Figuras 3C e 3F) nota-se expansão da região onde há concordância entre os modelos, principalmente sob cenário SSP5-8.5 (Figura 3F). Tal área atinge as porções norte e leste do setor NSA com redução entre 10% e 20%. Ao comparar as Figuras 4D e 4E, percebe-se que a maior contribuição para este clima mais seco ocorre em julho (janeiro) nas porções do Hemisfério Sul (Norte). Tal sinal de clima mais seco, apesar de não ser detectado na ALB no clima presente (Bazzanella, 2025; Luiz Silva *et al.*, 2025; Regoto *et al.*, 2021) também é projetado para o futuro por Marengo *et al.* (2023), Reboita *et al.* (2022), Almazouri *et al.* (2021), Ortega *et al.* (2021) e por Bazzanella (2025) que destacam uma redução de 300 mm/ano no final do século sob cenário SSP5-8.5.

Finalmente, a respeito da redução da precipitação no SWS, destaca-se no centro do Chile, a redução entre 10% e 20% entre 2041 e 2060 em ambos os cenários (Figuras 3C e 3F). A longo prazo, a mudança pluviométrica chega até -30% no centro-sul do SWS de acordo com o cenário de média emissão (Figura 4C), e sob o cenário SSP5-8.5 (Figura 3F) a redução percentual da precipitação atinge 40%. Salienta-se que esse clima mais seco na região central do Chile, como supracitado, já está sendo observado no clima presente (Bozkurt *et al.*, 2018) e também é projetado por diversos pesquisadores até o final do século (Marengo *et al.*, 2023; Torres *et al.*, 2021; Almazouri *et al.*, 2021; Bambach *et al.*, 2021). A redução da precipitação a longo prazo para ambos os cenários (Figuras 4C e 4F) abrange a porção do Oceano Pacífico

que contém o litoral do Chile, e o próprio território chileno que está contido no setor SWS da América do Sul. A tendência de clima seco ao sul do Chile durante o inverno no clima presente também é apontada por Bambach *et al.* (2021). Ademais, identifica-se que o núcleo de máxima redução da precipitação desloca-se para sul em janeiro e para norte em julho. Tal padrão concorda com o deslocamento de todos os sistemas meteorológicos, que se posicionam mais a norte no inverno e mais a sul no verão, acompanhando o movimento aparente do Sol (Satyamurty; Nobre; Silva Dias, 1998).

Neste contexto, destaca-se que, tanto a médio quanto a longo prazo, o cenário SSP5-8.5 (Figuras 4C e 4F) manifesta alterações climáticas mais significativas que o SSP2-4.5 (Figuras 3C e 3F). Entre 2081 e 2100 (Figuras 4C e 4F), a área de concordância do conjunto se expande, o que indica que as projeções individuais dos dez modelos para a América do Sul coincidem em mais áreas do que a médio prazo. A distribuição espacial da discordância entre modelos possui relação com os valores da mudança, isto é, o hachurado é assinalado, majoritariamente, em regiões com coloração cinza (onde a alteração na precipitação varia entre -5% e +5%).

4.2 Mudança Percentual na Precipitação Total no Brasil

Os gráficos apresentados nas Figuras 5 a 9 exibem boxplots da mudança percentual mensal projetada para a precipitação nas regiões N, NE, CO, SE e S do Brasil sob cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 para o final do século (2081-2100). Nesse tipo de representação é possível examinar a concordância entre os modelos. Ressalta-se primeiramente que a relação entre o comprimento do boxplot e a concordância entre os modelos é inversamente proporcional, ou seja, quanto mais extenso é o boxplot, menor é a concordância entre os modelos. Os valores das mudanças projetadas individualmente pelos modelos podem ser encontrados na Tabela A.1 do Apêndice A. As médias percentuais mensais e anuais de cada região, projetadas pelo conjunto, são encontradas na Tabela B.1 do Apêndice B, o que permite verificar separadamente a intensidade e o comportamento sazonal das alterações pluviométricas no território brasileiro.

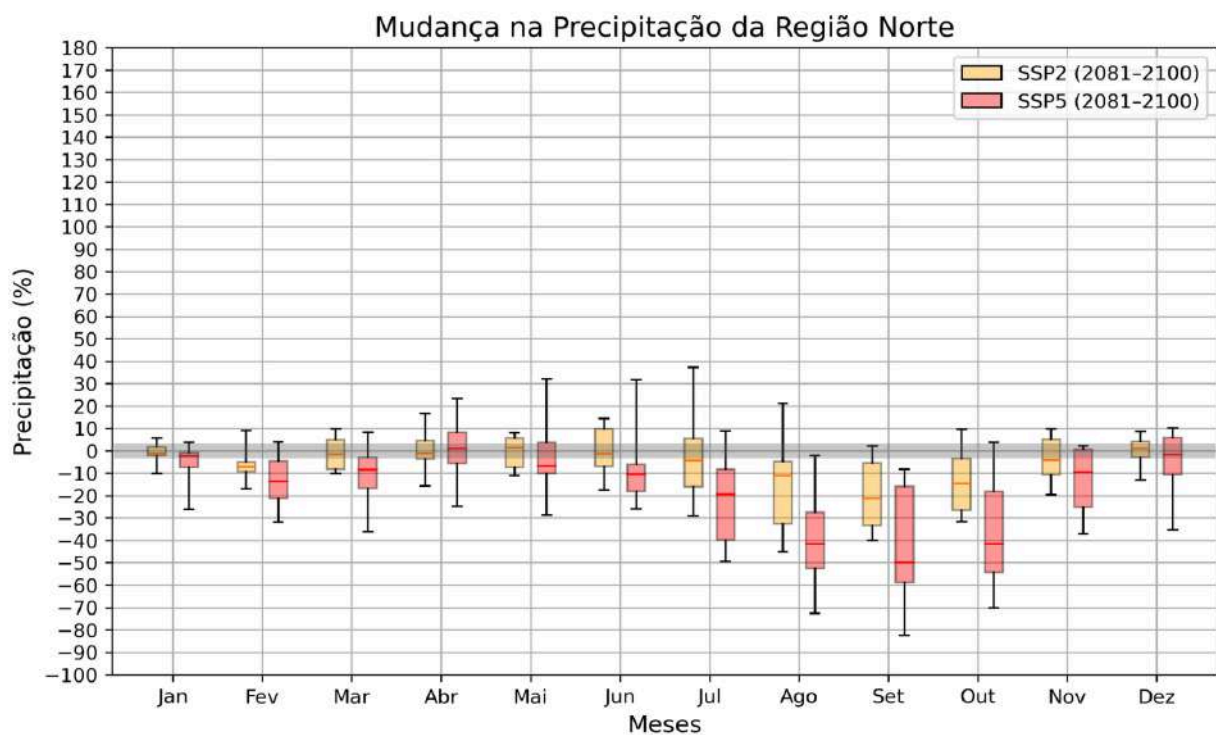
4.2.1 Região Norte do Brasil

Conforme exibido na Figura 5, projeta-se um clima mais seco na maior parte do ano para a Região N. Em geral, os modelos concordam com as mudanças na precipitação, sendo

que as maiores discordâncias entre eles se restringem aos meses de transição entre o final do inverno e início da primavera austral: agosto e setembro sob o cenário de média emissão; e setembro e outubro sob cenário SSP5-8.5. No mês de agosto, sob o SSP2-4.5, apenas um modelo projeta tendência ao clima úmido. E em setembro, dentre os dez modelos que compõem o conjunto, apenas dois projetam aumento nas chuvas da região.

Como projetado sob cenário SSP5-8.5, o mês de setembro demonstra maior variabilidade no conjunto em razão do abrangente intervalo que varia entre -82,5% e -8,3%. Já em outubro, a redução da precipitação foi projetada por nove dos dez modelos, com exceção de um modelo que aponta um aumento nas chuvas de 3,6%. A alta concordância entre os modelos é perceptível principalmente durante o verão (DJF) e também em abril para o SSP2-4.5, e no mês de janeiro para o SSP5-8.5.

Figura 5 - Boxplots mensais da mudança na precipitação (%) na Região Norte do Brasil para longo prazo (2081-2100) em relação ao período histórico (1995–2014), sob o cenário SSP2-4.5 (laranja) e SSP5-8.5 (vermelho). As caixas representam a variabilidade entre os 10 modelos do conjunto TOP10-CMIP6-AS. Os limites da caixa indicam o primeiro e terceiro quartis, a linha central na caixa representa a mediana dos modelos, e os extremos correspondem aos valores mínimos e máximos (sem considerar outliers). A linha cinza grossa no eixo y (0% de mudança) tem o intuito de facilitar a visualização e análise dos boxplots.



Fonte: Autoria própria (2025).

Os valores médios percentuais anuais da mudança projetados pelo conjunto (ver Tabela B.1 do Apêndice B) indicam que ambos os cenários apontam, a longo prazo (painel inferior), para um clima mais seco nesta região. Entre as médias percentuais mensais, o aumento da chuva é projetado pelo conjunto apenas em dezembro sob o SSP2-4.5, como mostrado pelo boxplot laranja para este mesmo mês na Figura 5. Outrossim, os meses de agosto, setembro e outubro (que marcam o fim do inverno austral e o início da primavera) concentram as maiores reduções para os dois cenários, assim como visualizado também na Figura 5.

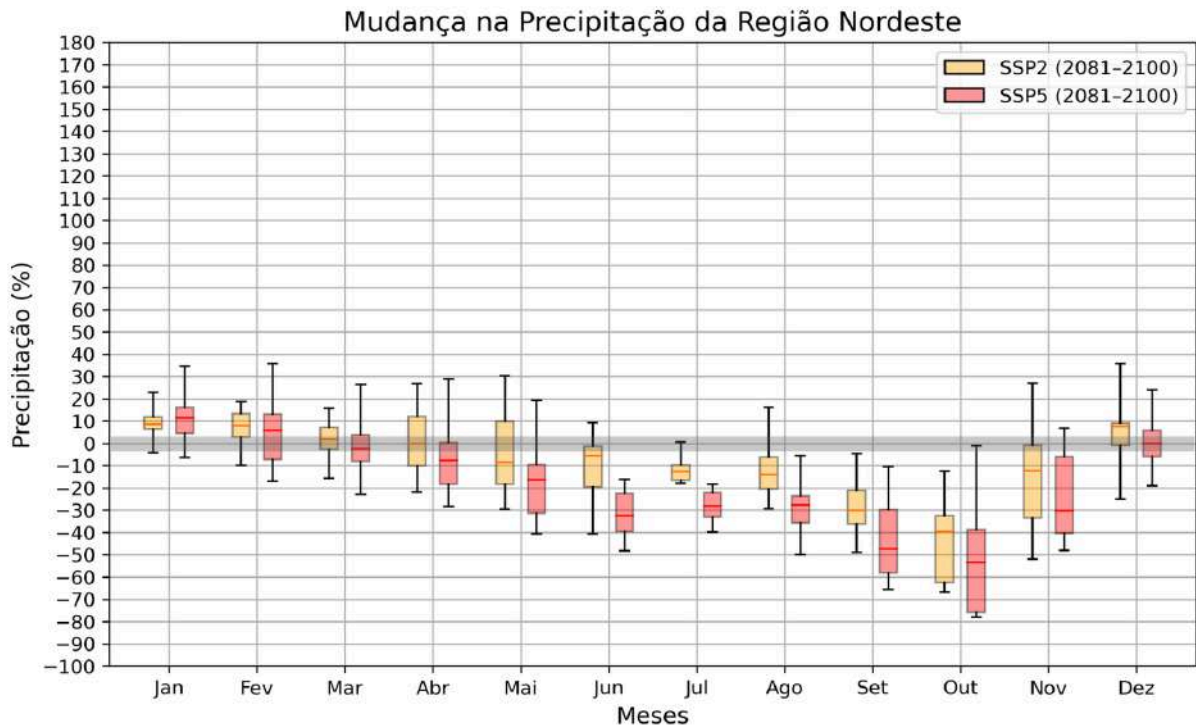
4.2.2 Região Nordeste do Brasil

Na Região NE, o conjunto de modelos também projeta um clima mais seco em ambos os cenários. A maior discordância dentro do conjunto coincide com o período onde os modelos projetam um clima mais seco, como explicitado pelas menores medianas (que indicam menos chuva) em setembro e outubro para ambos os cenários. Há maior concordância entre janeiro e julho (sob o cenário SSP2-4.5), e janeiro, julho, agosto e dezembro (sob o cenário SSP5-8.5), como explicitado na Figura 6. Contudo, há maior variabilidade entre as projeções do conjunto para maio, outubro e novembro (SSP2-4.5), e para SON (SSP5-8.5).

Em maio sob cenário de média emissão, por exemplo, quatro modelos apresentam clima mais úmido (com intervalo entre +1,8% e +30,2%). Assim como em novembro, apenas dois modelos do conjunto projetam aumento nas chuvas (+6,3% e +27%). Todavia, outubro é o mês em que todo o conjunto concorda com o sinal da mudança (redução) embora a variabilidade das projeções seja alta (entre -66,8% e -12,4%).

No que diz respeito ao SSP5-8.5 para os meses de setembro e outubro, todo o conjunto indica redução da chuva, cujos dados variam da seguinte forma: entre 10,5% e 65,6% para setembro; e entre 1,1% e 78% para outubro. Em geral, o conjunto segue o mesmo padrão (predominância de clima seco) para novembro sob o mesmo cenário, destacando-se apenas um modelo que discorda do sinal da mudança, com um aumento de 6,8%.

Figura 6 - Boxplots mensais da mudança na precipitação (%) na Região Nordeste do Brasil para longo prazo (2081-2100) em relação ao período histórico (1995–2014), sob o cenário SSP2-4.5 (laranja) e SSP5-8.5 (vermelho). As caixas representam a variabilidade entre os 10 modelos do conjunto TOP10-CMIP6-AS. Os limites da caixa indicam o primeiro e terceiro quartis, a linha central na caixa representa a mediana dos modelos, e os extremos correspondem aos valores mínimos e máximos (sem considerar outliers). A linha cinza grossa no eixo y (0% de mudança) tem o intuito de facilitar a visualização e análise dos boxplots.



Fonte: Autoria própria (2025).

A Região NE apresenta médias percentuais mensais (ver Tabela B.1 do Apêndice B) que indicam redução pluviométrica em boa parte do ano, exceto para DJF e março sob ambos os cenários e prazos (os dados desse período contribuem para o percentual anual desta região). Este agravamento na diminuição do volume de chuvas na Região NE é apontado por Haylock *et al.* (2006), Dereczynski *et al.* (2020), e Correa *et al.* (2022), como influência de alguns fatores: maior concentração de GEEs; deslocamento da ZCIT para o norte; e modificações no uso e cobertura do solo.

4.2.3 Região Centro-Oeste do Brasil

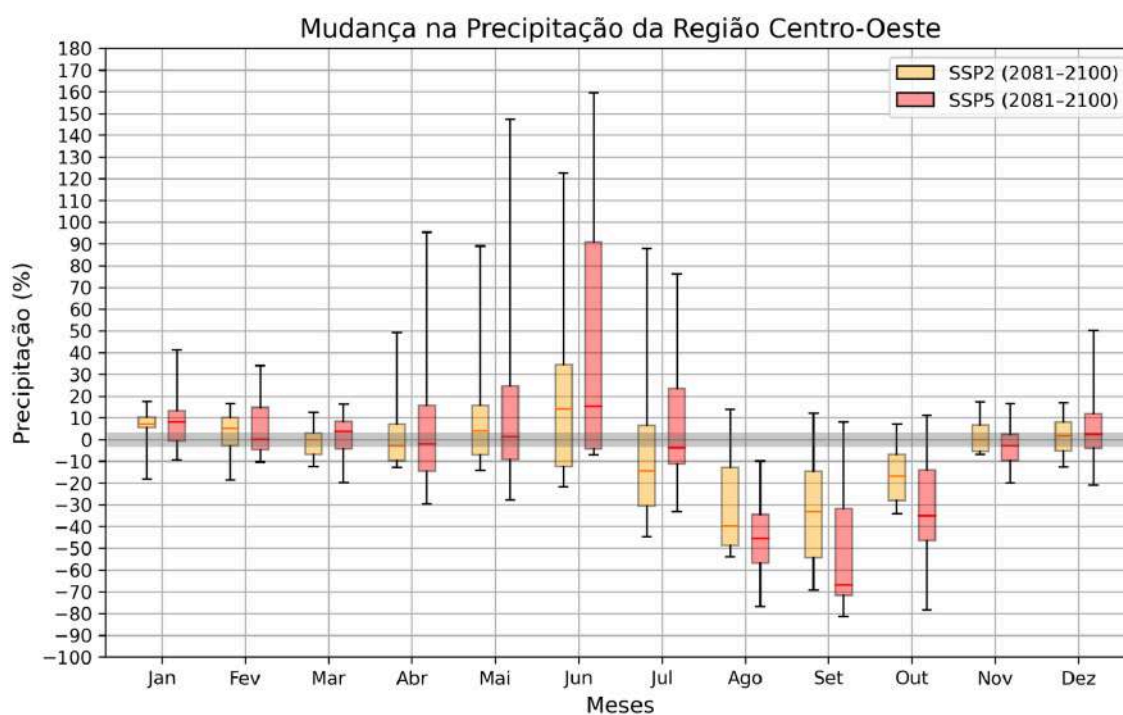
Na Região CO (Figura 7), há predominância de clima mais úmido durante o ano em ambos os cenários, com exceção dos meses de julho, agosto, setembro e outubro. As medianas de maior redução pluviométrica, sob o cenário de média emissão, são projetadas em agosto e setembro sob o cenário SSP2-4.5, e apenas em setembro no SSP5-8.5.

A alta convergência entre os modelos ocorre nos meses de janeiro e março sob o cenário de média emissão, e em março e novembro sob o cenário SSP5-8.5. Em contraste, a alta variabilidade dentro do conjunto é apontada no cenário SSP2-4.5 em junho, julho e setembro, e pelo cenário de alta emissão em junho.

Em junho para o SSP2-4.5, quatro dos dez modelos projetam redução pluviométrica (entre -14,9% e -9,2%), enquanto os outros seis mostram um clima mais úmido (com intervalo entre +7,7% e +122,5%). Já em julho, apenas três modelos projetam clima úmido, enquanto o restante do conjunto apresenta diminuição da chuva com mudanças entre -44,8% e -1,8%. Por fim, no mês de setembro o clima mais seco é projetado por nove modelos (com alterações entre -69,2% e -7,3%), com exceção de um modelo que indica um aumento pluviométrico de 12,2%.

Em julho, o cenário de alta emissão demonstra alta variação entre os seis modelos que projetam clima úmido cujo intervalo abrange +12,1% e +159,4%. A redução nas chuvas neste mês é apontada por quatro modelos cujos dados oscilam entre -7,1% e -4,1%.

Figura 7 - Boxplots mensais da mudança na precipitação (%) na Região Centro-Oeste do Brasil para longo prazo (2081-2100) em relação ao período histórico (1995–2014), sob o cenário SSP2-4.5 (laranja) e SSP5-8.5 (vermelho). As caixas representam a variabilidade entre os 10 modelos do conjunto TOP10-CMIP6-AS. Os limites da caixa indicam o primeiro e terceiro quartis, a linha central na caixa representa a mediana dos modelos, e os extremos correspondem aos valores mínimos e máximos (sem considerar outliers). A linha cinza grossa no eixo y (0% de mudança) tem o intuito de facilitar a visualização e análise dos boxplots.



Fonte: Autoria própria (2025).

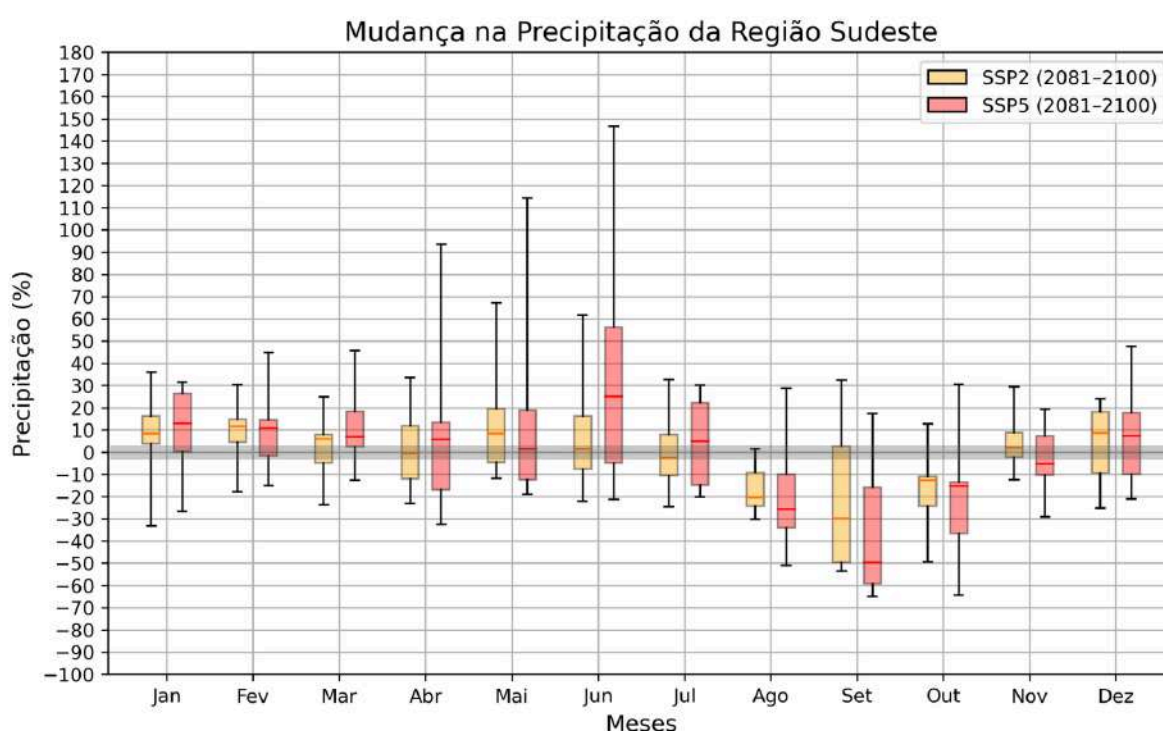
Nesta região, a longo prazo e sob ambos os cenários, as médias percentuais mensais (ver Tabela B.1 do Apêndice B) associadas ao clima mais seco são projetadas entre o inverno e a primavera austral (julho, agosto, setembro e outubro), assim como visualizado na Figura 7. No entanto, nota-se que as médias anuais são positivas (aumento pluviométrico) para os dois cenários, visto que a quantidade de meses onde há projeção de clima mais úmido prevalece aos meses com altos valores de diminuição no regime de chuvas.

4.2.4 Região Sudeste do Brasil

Na Região SE (Figura 8), os modelos projetam um clima mais úmido, exceto em agosto, setembro e outubro. Aliás, destaca-se a alta concordância entre os modelos nos meses de fevereiro e novembro sob o SSP2-4.5, e em março e novembro no cenário de alta emissão.

No contexto do SSP2-4.5 em setembro, o aumento na chuva é indicado por apenas por três modelos, enquanto o restante do conjunto projeta mudanças que variam entre -53,6% e -5,9%. Com relação ao cenário de alta emissão, grande parte do conjunto concorda com o sinal de aumento pluviométrico ao longo do ano. No entanto, em junho nota-se uma baixa concordância entre as projeções dos modelos, já que as alterações pluviométricas variam entre -21,2% e +146,6%. Em setembro sob SSP5-8.5, o conjunto fica dividido da seguinte forma: clima úmido para dois modelos com aumento de 4,9% e 17,2%; e clima seco para os outros oito modelos, com mudanças que variam entre -64,9% e -7,3%.

Figura 8 - Boxplots mensais da mudança na precipitação (%) na Região Sudeste do Brasil para longo prazo (2081-2100) em relação ao período histórico (1995–2014), sob o cenário SSP2-4.5 (laranja) e SSP5-8.5 (vermelho). As caixas representam a variabilidade entre os 10 modelos do conjunto TOP10-CMIP6-AS. Os limites da caixa indicam o primeiro e terceiro quartis, a linha central na caixa representa a mediana dos modelos, e os extremos correspondem aos valores mínimos e máximos (sem considerar outliers). A linha cinza grossa no eixo y (0% de mudança) tem o intuito de facilitar a visualização e análise dos boxplots.



Fonte: Autoria própria (2025).

A longo prazo (ver painel inferior da Tabela B.1 do Apêndice B), a Região SE exibe médias percentuais negativas (predominância do clima mais seco) para o período de agosto a novembro sob o cenário de alta emissão. Em contrapartida, o projetado para os demais meses concorda com as projeções anuais do conjunto, em ambos os cenários, já que os valores indicam aumento pluviométrico, o que condiz com a predominância de clima mais úmido observado na Figura 8.

4.2.5 Região Sul do Brasil

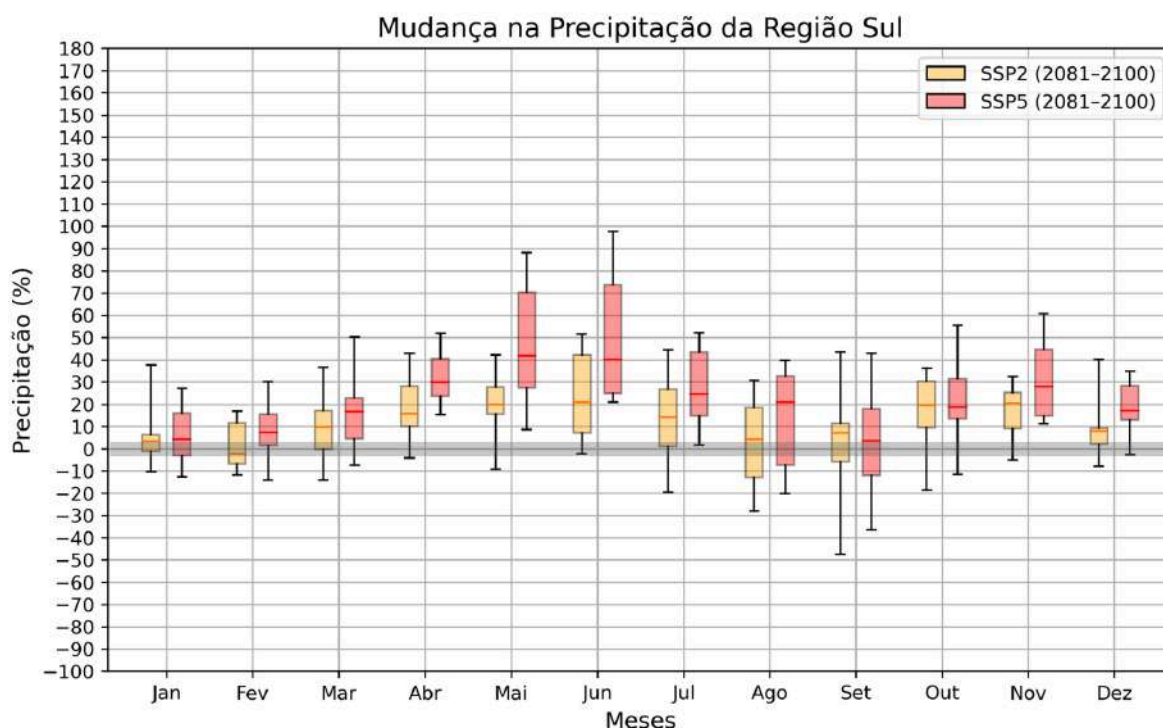
O clima úmido na Região S (Figura 9) ao longo do ano é coerente com a projeção do TOP10-CMIP6-AS para o setor SES do continente sul-americano ao fim do século (Figuras 4C e 4F). As medianas máximas (que indicam maior aumento nas chuvas) ocorrem nos meses

de maio, junho, outubro e novembro sob o cenário SSP2-4.5, e maio e junho sob o cenário SSP5-8.5. Entretanto, as medianas mínimas (valores de maior redução pluviométrica) são indicadas em fevereiro sob o SSP2-4.5, e em janeiro, fevereiro e setembro sob o cenário de alta emissão. Além disso, a maior concordância entre os modelos se apresenta no mês de dezembro para ambos os cenários, assim como em janeiro sob o cenário SSP2-4.5 e em fevereiro no cenário de alta emissão.

Com relação à variabilidade, o conjunto discorda mais em junho e agosto para o cenário de média emissão, e nos meses de maio, junho e agosto para o SSP5-8.5. Em junho para o cenário SSP2-4.5, o intervalo projetado por nove modelos para o aumento no regime de chuvas varia entre +2,1% e +51,4%, com exceção de um modelo que indica -2,4%. Mas em agosto, sob este mesmo cenário, quatro modelos do conjunto projetam um clima mais seco, enquanto os demais exibem um aumento que varia entre 1,8% e 30,6%.

Para o SSP5-8.5, em maio e em junho todo o conjunto concorda com o sinal da mudança, porém os dados apresentam grande variação (entre +8,7% e +88,1%, e entre +21,6% e +97,7%, respectivamente). Em agosto, seis modelos apontam aumento na chuva (intervalo entre 17,4% e 39,7%), à medida que os outros quatro modelos manifestam uma mudança entre -20,2% e -8,0%.

Figura 9 - Boxplots mensais da mudança na precipitação (%) na Região Sul do Brasil para longo prazo (2081-2100) em relação ao período histórico (1995–2014), sob o cenário SSP2-4.5 (laranja) e SSP5-8.5 (vermelho). As caixas representam a variabilidade entre os 10 modelos do conjunto TOP10-CMIP6-AS. Os limites da caixa indicam o primeiro e terceiro quartis, a linha central na caixa representa a mediana dos modelos, e os extremos correspondem aos valores mínimos e máximos (sem considerar outliers). A linha cinza grossa no eixo y (0% de mudança) tem o intuito de facilitar a visualização e análise dos boxplots.



Fonte: Autoria própria (2025).

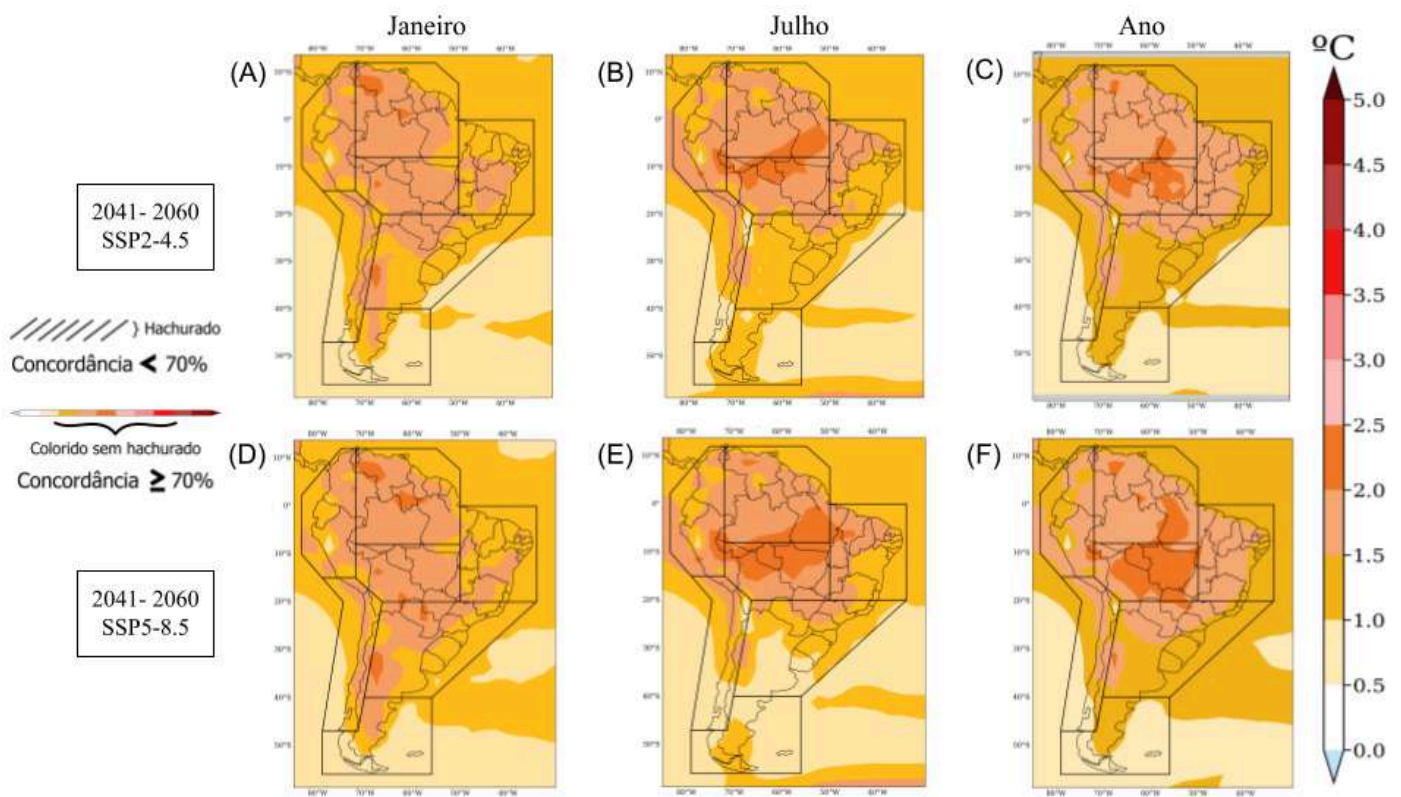
Esta região, dentre as cinco, é a que indica clima mais úmido, como demonstrado pela mudança média percentual anual e mensal (principalmente em abril e maio) para ambos os cenários (Tabela B.1 do Apêndice B). Tais resultados estão em acordo com as informações obtidas na pesquisa da PNA (BRASIL, 2016), na qual se observa maior volume pluviométrico para a área que abrange as regiões CO e S, sendo corroborado neste estudo para médio e longo prazo, o que inclui os períodos de DJF e MAM.

4.3 Mudança na Temperatura Média do Ar na América do Sul

Este subcapítulo discorre sobre as mudanças na temperatura média do ar, em °C, projetadas pelo conjunto de dez modelos CMIP6 para a AS. A Figura 10 e a Figura 11 apresentam as mudanças, em relação ao clima presente (1995-2014) em janeiro, julho e anual no médio termo (2041-2060) e no longo termo (2081-2100), respectivamente. Em ambas as

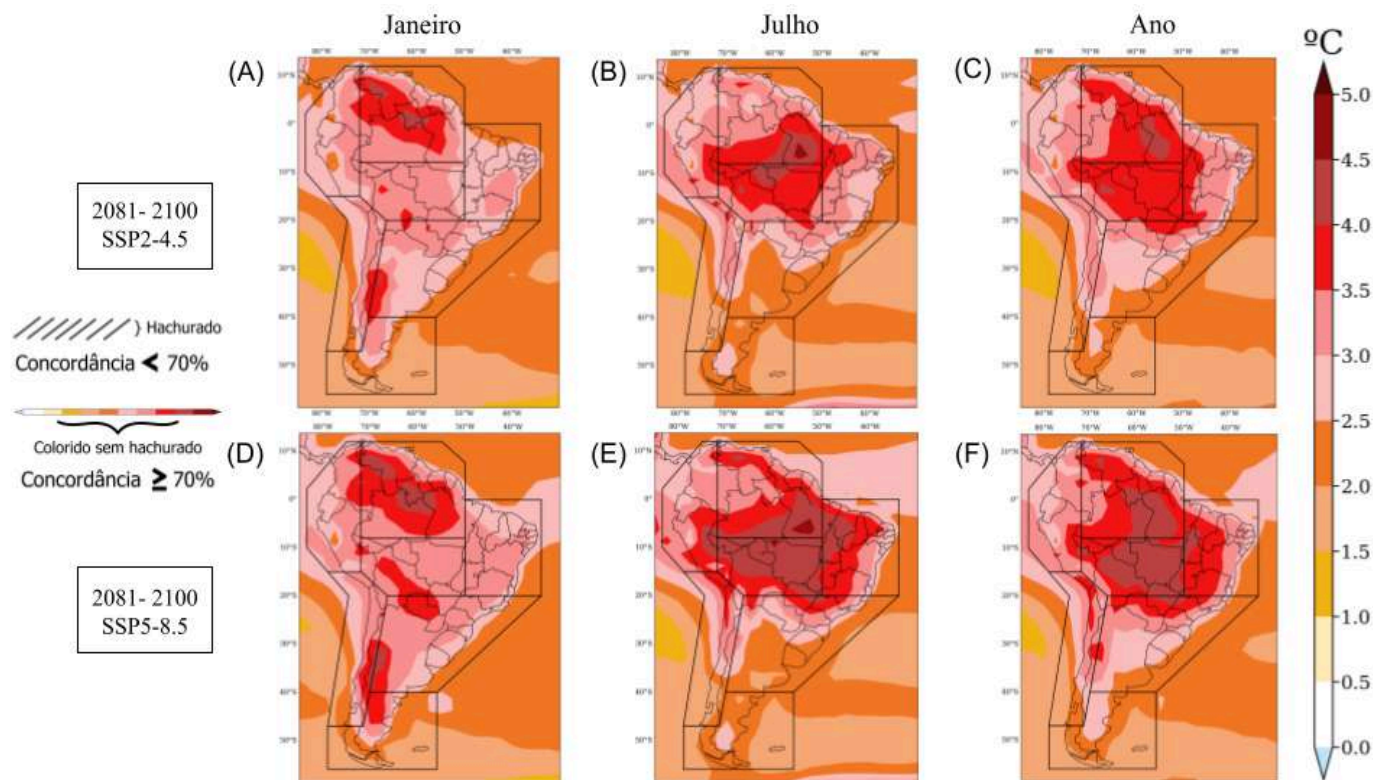
figuras são apresentadas as mudanças sob o cenário SSP2-4.5 (SSP5-8.5) no painel superior (painel inferior). As figuras das mudanças no ano (coluna da direita) incluem a concordância entre os modelos, onde a área colorida sem hachurados (/) indica regiões onde 70% dos modelos (7 modelos) ou mais concordam com o sinal da mudança na precipitação total.

Figura 10 - Mudança na temperatura média do ar (°C) para o período 2041-2060, em relação a 1995-2014, para: (A) janeiro sob cenário SSP2-4.5; (B) julho sob cenário SSP2-4.5; (C) anual sob cenário SSP2-4.5; (D) janeiro sob cenário SSP5-8.5; (E) julho sob cenário SSP5-8.5; e (F) anual sob cenário SSP5-8.5. As áreas coloridas, sem hachurado (/), exibidas na coluna à direita representam uma concordância superior a 70% sobre o sinal da mudança.



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 11 - Mudança na temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$) para o período 2081-2100, em relação a 1995-2014, para: (A) janeiro sob cenário SSP2-4.5; (B) julho sob cenário SSP2-4.5; (C) anual sob cenário SSP2-4.5; (D) janeiro sob cenário SSP5-8.5; (E) julho sob cenário SSP5-8.5; e (F) anual sob cenário SSP5-8.5. As áreas coloridas, sem hachurado (/), exibidas na coluna à direita representam uma concordância superior a 70% sobre o sinal da mudança.



Fonte: Autoria própria (2025).

Nota-se, em geral, uma alta concordância entre os modelos a respeito do aumento na temperatura no clima futuro da AS a médio e longo prazos. Observa-se nas projeções um gradiente norte/sul com maiores (menores) aquecimentos no norte (sul) da América do Sul, principalmente sobre o SAM e NSA. Tal resultado também é ressaltado por Marengo *et al.* (2023), Torres *et al.* (2021), Almazroui *et al.* (2021), Ortega *et al.* (2021) e Moraes, Wanderley e Delgado (2023). De forma geral, as projeções apresentam padrão similar para ambos os cenários tanto a médio prazo (Figura 10) como no longo prazo (Figura 11). Por exemplo, o padrão de aquecimento para o final do século em janeiro sob cenário SSP2-4.5 (Figura 11A) é similar ao padrão de janeiro sob cenário SSP5-8.5 (Figura 11D). E o mesmo ocorre para julho e anual. Ademais, nota-se que no inverno (julho) o aquecimento é maior do que no verão (janeiro), o que pode estar associado à redução da precipitação em julho na maior parte do continente, exceto no SES. Ortega *et al.* (2021) também mostram que o aquecimento na América do Sul em SON e JJA é superior a DJF e MAM.

É perceptível que a médio prazo (Figuras 10A e 10D), apenas partes dos setores SWS e SSA apresentam aumento na temperatura abaixo de 1°C, enquanto ambos os cenários projetam um aquecimento mais significativo que se restringe ao norte do setor NSA e oeste do SES.

A longo prazo (Figura 11) os cenários exibem diferentes distribuições espaciais e sazonais para o aumento na temperatura média do ar no continente. A exemplo disso, a zona de maior aquecimento indicada para janeiro é mais extensa sob o SSP5-8.5 (Figura 10D) do que a projetada pelo cenário de média emissão (Figura 11A). Os setores NSA e SAM são os que mais aquecem ao final do século (Figura 11), e o aumento que ultrapassa os 4°C sob cenário SSP5-8.5 (Figura 11F) impacta principalmente as regiões N e CO do país. Torres *et al.* (2021) apontam estes setores da AS como aqueles que apresentarão um aumento na temperatura antes do restante do continente, atingindo principalmente o CO do Brasil, e parte da Amazônia e dos Andes.

Ressalta-se que a alta taxa de aquecimento alcançada ao fim do século na AS afetará a frequência, duração e intensidade das ondas de calor que são previstas para áreas tropicais (como é o caso do continente sul-americano), como citado nos estudos de Monteiro dos Santos *et al.* (2024) e Collazo, Barrucand e Rusticucci (2023).

4.4 Mudança na Temperatura Média do Ar no Brasil

Os boxplots contidos nas Figuras 12 a 16 exibem a mudança mensal projetada para a temperatura média do ar nas cinco regiões brasileiras sob cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 para o final do século (2081-2100). Como supramencionado, os boxplots são úteis para analisar a discordância entre os modelos. Nota-se então que, embora as Figuras 10 e 11 assegurem uma concordância de pelo menos 70% para o conjunto (o que se deve ao fato de todos projetarem aumento na temperatura independente do prazo), os boxplots indicam que há diferentes taxas de aquecimento representadas no TOP10-CMIP6-AS. Estas características são expressas da seguinte forma: os valores que compõem os boxplots de todas as regiões, incluindo os extremos (máximos e mínimos), são maiores que 0,5°C; e a largura das caixas aponta maior ou menor grau de concordância de acordo com o cenário, a região e o mês. Os valores das mudanças projetadas individualmente por alguns modelos são citados abaixo e podem ser encontrados na Tabela C.1 do Apêndice C. As médias mensais e anuais de cada região, projetadas pelo conjunto, são encontradas na Tabela D.1 do Apêndice D, o que permite

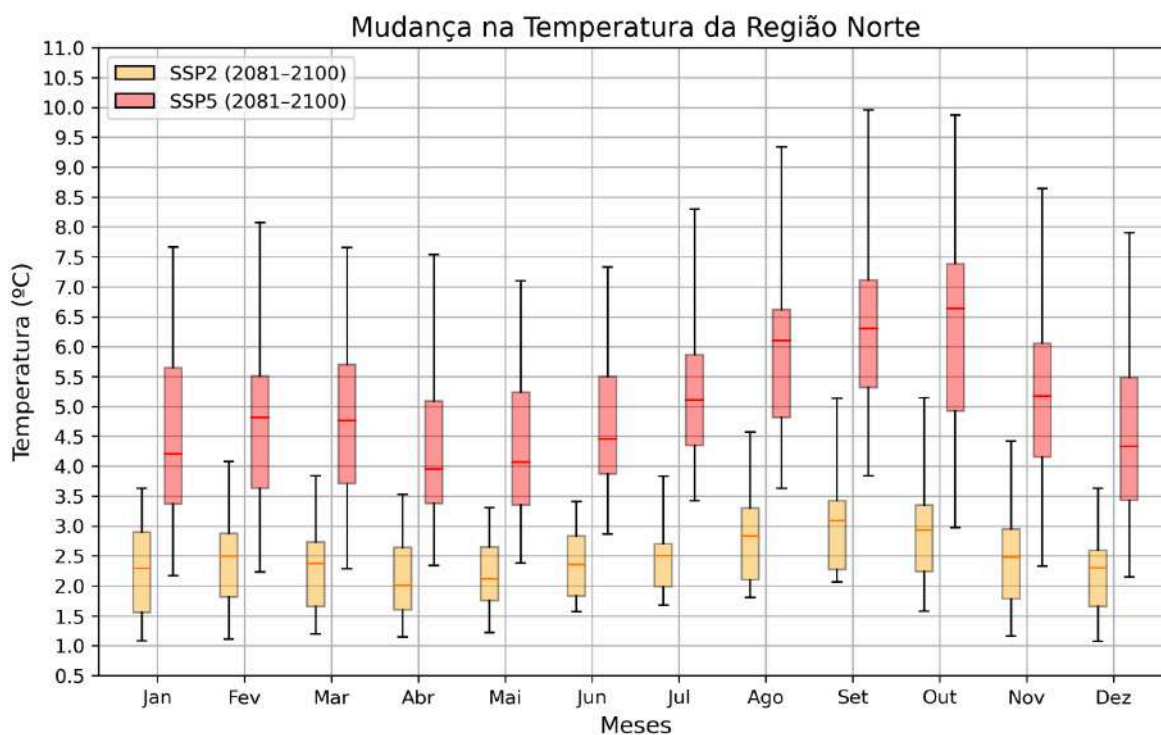
verificar a intensidade e a tendência sazonal das mudanças na temperatura média do ar no Brasil.

4.4.1 Região Norte do Brasil

Na Região N (Figura 12), as maiores medianas no cenário de média emissão ocorrem em setembro. Já sob o SSP5-8.5, o conjunto indica uma mudança mais extrema para outubro. Além disso, constata-se maior concordância entre os modelos em julho para ambos os cenários (boxplots em laranja para o SSP2-4.5, e em vermelho para o SSP5-8.5). As menores medianas, também em ambos os cenários, ocorrem em abril.

Nota-se maior variabilidade entre os modelos para os meses de janeiro (em ambos os cenários) e outubro (SSP5-8.5). Sob cenário SSP2-4.5, dois dos dez modelos do conjunto influenciam na maior incerteza do conjunto para o mês de agosto.

Figura 12 - Boxplots mensais da mudança da temperatura média (°C) na Região Norte para longo prazo (2081–2100) em relação ao período histórico de 1995–2014, segundo o SSP2-4.5 (laranja) e SSP5-8.5 (vermelho). As caixas representam a variabilidade entre os 10 modelos do conjunto TOP10-CMIP6-AS. Os limites da caixa indicam o primeiro e terceiro quartis, a linha central na caixa representa a mediana dos modelos, e os extremos correspondem aos valores mínimos e máximos (sem considerar outliers).



Fonte: Autoria própria (2025).

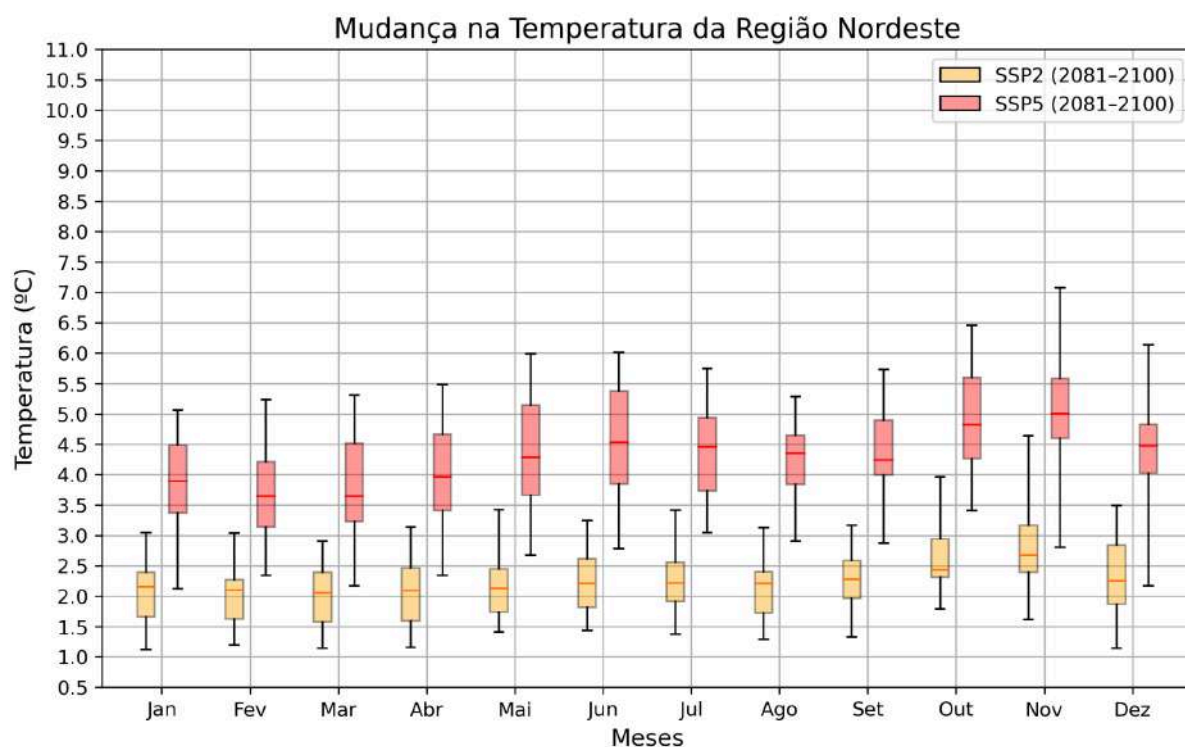
A Região N se encontra nas zonas de alto aquecimento ao fim do século (ver painel inferior da Tabela D.1 do Apêndice D), com destaque para um médias significativas projetadas para setembro sob o SSP2-4.5, e outubro sob o SSP5-8.5. Nobre *et al.* (2016) e Correa *et al.* (2022) associam as mudanças atuais na temperatura média do ar para esta região do Brasil, principalmente durante a primavera, às atividades antrópicas e suas consequências, como o desmatamento para a expansão da fronteira agrícola ou substituição por pasto e progresso do garimpo. Além disso, para Marengo *et al.* (2022), o desmatamento na Amazônia também vem modificando a duração e as condições de temperatura e umidade durante a transição da estação úmida para seca, fato este que colabora para o aumento dos incêndios florestais nas últimas décadas.

4.4.2 Região Nordeste do Brasil

A Região NE (Figura 13) exibe menor discordância entre os modelos nos meses de fevereiro, maio, julho, setembro e outubro sob o SSP2-4.5, ao mesmo tempo que para o SSP5-8.5 isto ocorre apenas em dezembro. Ademais, as medianas do mês de novembro, em ambos os cenários, correspondem ao aquecimento mais drástico. Então, as medianas que indicam menor aumento da temperatura são encontradas nos demais onze meses sob o SSP2-4.5, e nos meses de janeiro, fevereiro, março e abril sob o SSP5-8.5.

A alta variabilidade entre as projeções dos modelos sob o SSP2-4.5 está restrita à dezembro, com os extremos do intervalo sendo +1,1°C e +3,5°C. Para o SSP5-8.5, os dados do conjunto variam mais nos meses de maio e junho.

Figura 13 - Boxplots mensais da mudança da temperatura média (°C) na Região Nordeste para longo prazo (2081–2100) em relação ao período histórico de 1995–2014, segundo o SSP2-4.5 (laranja) e SSP5-8.5 (vermelho). As caixas representam a variabilidade entre os 10 modelos do conjunto TOP10-CMIP6-AS. Os limites da caixa indicam o primeiro e terceiro quartis, a linha central na caixa representa a mediana dos modelos, e os extremos correspondem aos valores mínimos e máximos (sem considerar outliers).



Fonte: Autoria própria (2025).

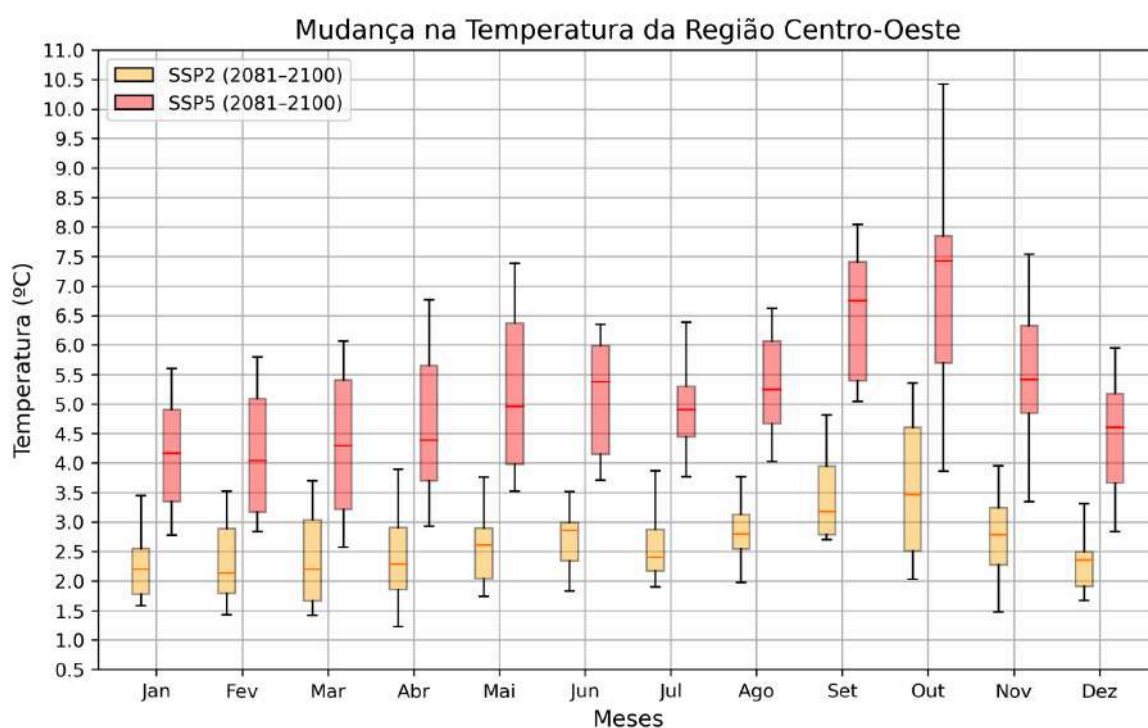
No NE, ao fim do século (ver painel inferior da Tabela D.1 do Apêndice D), ambos os cenários continuam a projetar médias mensais mais extremas na temperatura para novembro, em conformidade com as medianas mais altas exibidas pelo SSP2-4.5 e pelo SSP5-8.5 na Figura 13. As médias anuais, sob os dois cenários, apresentam um aquecimento considerável, ainda que com mudanças um tanto mais amenas do que as projetadas para a Região Norte, por exemplo.

4.4.3 Região Centro-Oeste do Brasil

Na Região CO (Figura 14), as medianas mais altas em ambos os cenários ocorrem em outubro, e também em setembro para o cenário de média emissão. O aquecimento mais sutil projetado pelo conjunto está representado pelas medianas em janeiro, fevereiro, março, julho e dezembro para o SSP2-4.5, e em janeiro, fevereiro, março e abril sob o SSP5-8.5.

Outrossim, cita-se menor variabilidade entre as projeções individuais em agosto e dezembro segundo o cenário SSP2-4.5, ao passo que para o SSP5-8.5 isto ocorre apenas em julho. De acordo com o cenário de alta emissão, os meses de maio, junho e outubro apresentam maior discordância entre os modelos, com os seguintes intervalos: entre +2,6°C e +6,1°C em março; entre +3,5°C e +7,0°C em maio; e entre +3,9°C e +10,4°C em outubro. Para o SSP2-4.5, há maior variabilidade em outubro devido aos extremos apontados por dois modelos cujos valores são: +2°C e +5,4°C.

Figura 14 - Boxplots mensais da mudança da temperatura média (°C) na Região Centro-Oeste para longo prazo (2081–2100) em relação ao período histórico de 1995–2014, segundo o SSP2-4.5 (laranja) e SSP5-8.5 (vermelho). As caixas representam a variabilidade entre os 10 modelos do conjunto TOP10-CMIP6-AS. Os limites da caixa indicam o primeiro e terceiro quartis, a linha central na caixa representa a mediana dos modelos, e os extremos correspondem aos valores mínimos e máximos (sem considerar outliers).



Fonte: Autoria própria (2025).

O CO, com grande parte de seu território no setor SAM da AS, é uma das duas regiões (junto com a Região N) onde o conjunto projeta intenso aquecimento no clima futuro. A longo prazo (ver painel inferior da Tabela D.1 do Apêndice D), a média mais alta é indicada em outubro em ambos os cenários. Porém, salienta-se que as temperaturas projetadas pelo CMIP6 para o CO durante a primavera austral (SON) são maximizadas em comparação com os demais meses do ano. Isso é atribuído por Marengo *et al.* (2009) e Correa *et al.* (2022), ao

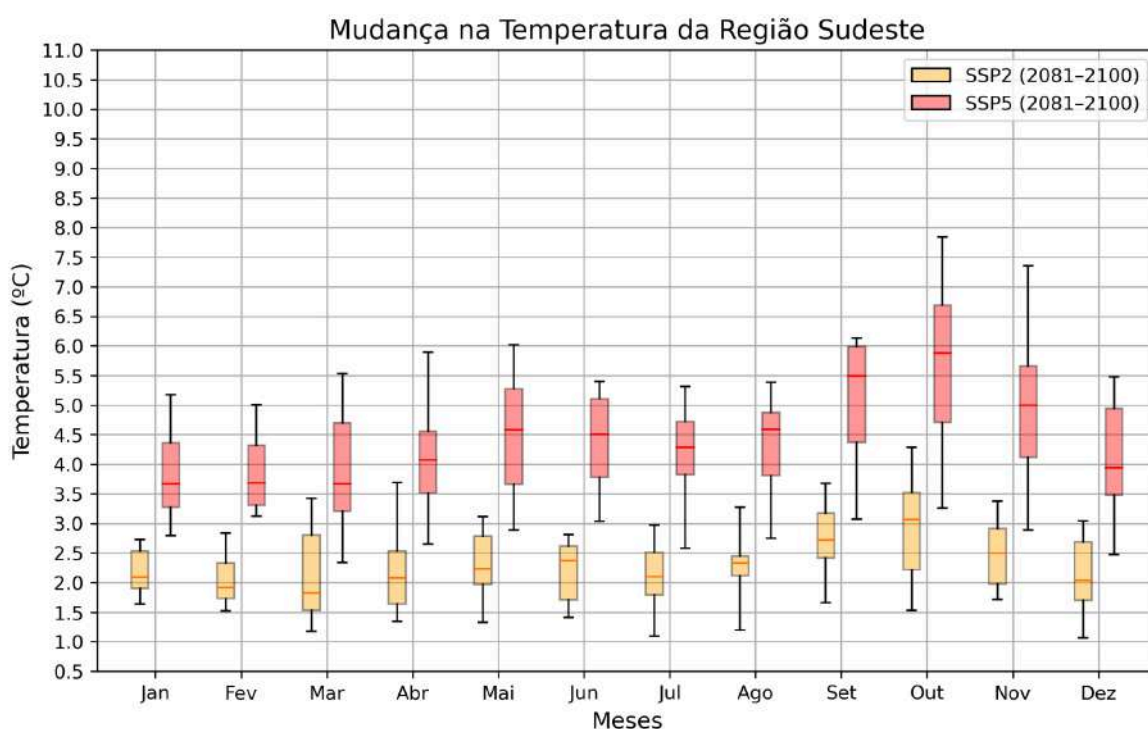
baixo desempenho dos modelos climáticos globais em representar devidamente a dinâmica da circulação atmosférica desta região especificamente neste período.

4.4.4 Região Sudeste do Brasil

Para a Região SE (Figura 15), o SSP2-4.5 indica maior concordância entre os modelos em agosto, enquanto o SSP5-8.5 apresenta menor discordância em julho. Salienta-se que, no cenário de média emissão, as maiores medianas ocorrem em outubro, e as medianas que correspondem a um aquecimento menos drástico são exibidas nos meses de fevereiro e março. Sob o SSP5-8.5, as medianas contidas no intervalo de mudança máxima se manifestam em setembro e outubro.

As projeções do conjunto variam mais em março e outubro segundo o SSP2-4.5, cujos extenso intervalo dos dados se dá da seguinte maneira: entre +1,2°C e +3,4°C em março; e entre +1,5°C e +4,3°C em outubro. E sob cenário de alta emissão, a maior discordância entre os modelos é encontrada em março, maio, outubro e novembro. Todavia, o fim do inverno nesta região é marcado pela menor variabilidade entre as projeções do conjunto (julho para o SSP5-8.5, e agosto para o SSP2-4.5).

Figura 15 - Boxplots mensais da mudança da temperatura média (°C) na Região Sudeste para longo prazo (2081–2100) em relação ao período histórico de 1995–2014, segundo o SSP2-4.5 (laranja) e SSP5-8.5 (vermelho). As caixas representam a variabilidade entre os 10 modelos do conjunto TOP10-CMIP6-AS. Os limites da caixa indicam o primeiro e terceiro quartis, a linha central na caixa representa a mediana dos modelos, e os extremos correspondem aos valores mínimos e máximos (sem considerar outliers).



Fonte: Autoria própria (2025).

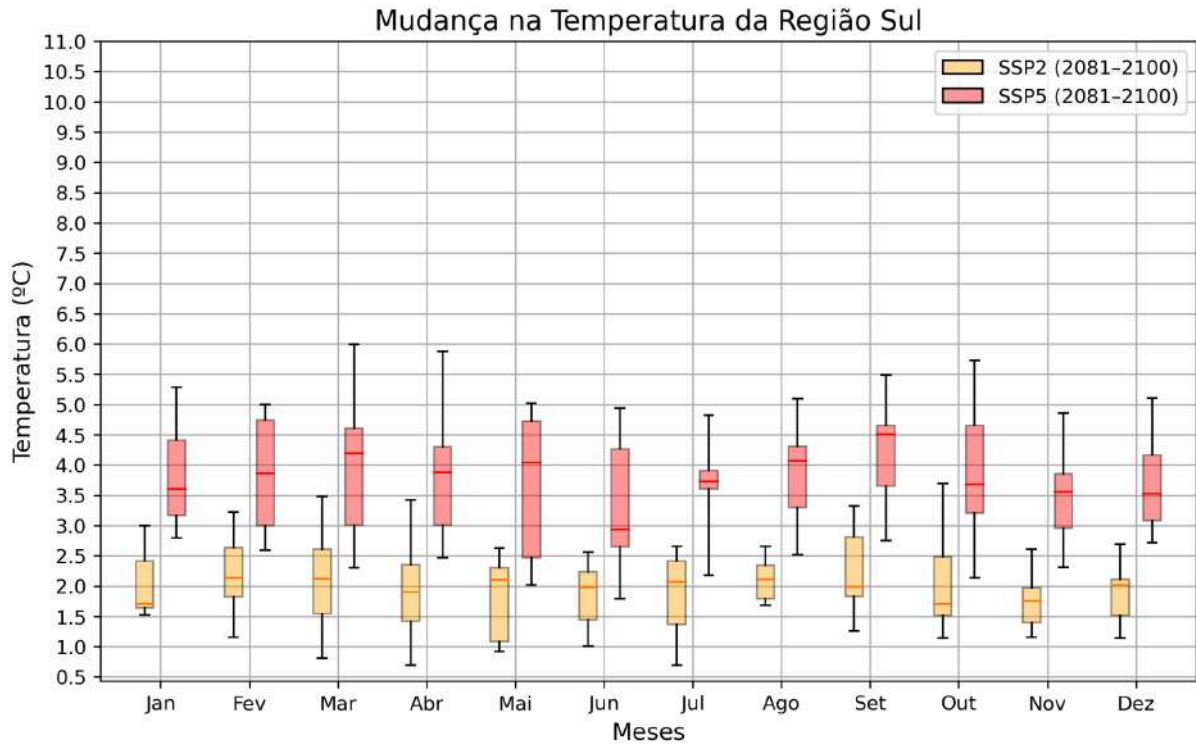
Para a Região SE, o conjunto projeta maior aquecimento em outubro para ambos os cenários entre 2081-2100 (ver painel inferior da Tabela D.1 do Apêndice D). As menores médias (aumento mais sutil da temperatura) são encontradas em DJF e MAM. Aliás, salienta-se que estudos destacam a boa performance dos modelos do CMIP6 para representar a variação na temperatura do clima presente da Região SE (Correa *et al.*, 2022).

4.4.5 Região Sul do Brasil

No caso da Região S (Figura 16), as medianas que indicam tendência a um aquecimento extremo no SSP2-4.5 são encontradas nos meses de fevereiro, março, maio, JJA (inverno austral), e dezembro. Embora, para o SSP5-8.5, a maior mediana (em setembro) indique uma mudança ainda mais drástica do que o cenário de média emissão, a menor variabilidade entre as projeções dos modelos sob o SSP2-4.5 ocorre apenas em agosto e novembro, e em julho para o SSP5-8.5.

Três modelos aumentam o grau de variabilidade do conjunto sob o SSP2-4.5 em maio com mudança de +0,9% e +2,6%. No cenário de alta emissão, a maior discordância entre as projeções se restringe aos meses de fevereiro e maio.

Figura 16 - Boxplots mensais da mudança da temperatura média (°C) na Região Sul para longo prazo (2081–2100) em relação ao período histórico de 1995–2014, segundo o SSP2-4.5 (laranja) e SSP5-8.5 (vermelho). As caixas representam a variabilidade entre os 10 modelos do conjunto TOP10-CMIP6-AS. Os limites da caixa indicam o primeiro e terceiro quartis, a linha central na caixa representa a mediana dos modelos, e os extremos correspondem aos valores mínimos e máximos (sem considerar outliers).



Fonte: Autoria própria (2025).

A Região S exibe as menores médias anuais dentre as regiões brasileiras para ambos os prazos e cenários (ver Tabela D.1 do Apêndice D), e o aumento menos sutil ao fim do século se concentra em maio e novembro sob o SSP2-4.5, e em junho sob o SSP5-8.5. O mês com maior aquecimento projetado pelo conjunto para ambos os cenários a longo prazo é setembro. Ressalta-se que a mudança na temperatura, sob contexto do clima presente, nesta região também é citada por Correa *et al.* (2022), juntamente com o SE, como sendo bem representada pelos modelos CMIP6.

5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste estudo foram investigadas as mudanças percentuais na precipitação e na temperatura média do ar para as regiões da AS sob cenários de média (SSP2-4.5) e alta (SSP5-8.5) emissão de GEEs para médio (2041-2060) e longo (2081-2100) prazos. Além disso, foram também analisadas as mudanças nestas mesmas variáveis, sob os mesmos cenários e prazos, nas cinco regiões brasileiras. Salienta-se que os dados utilizados neste trabalho provêm de um conjunto de dez modelos climáticos globais do CMIP6 (TOP10-CMIP-AS).

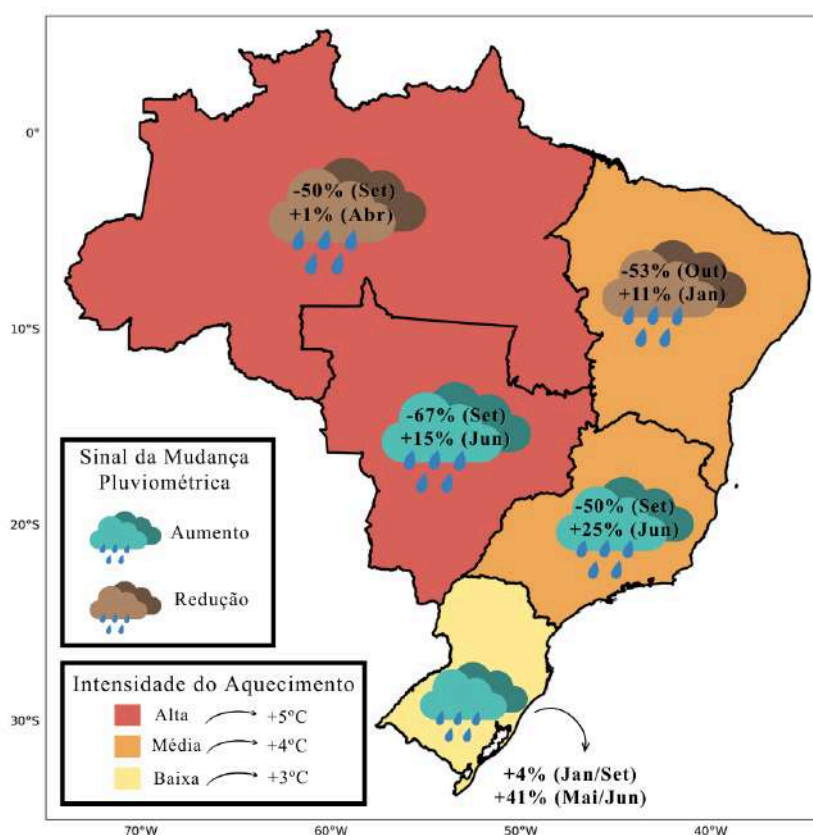
As mudanças percentuais pluviométricas projetadas neste trabalho para os setores NSA, SES e SWS da AS, e que apresentam maior concordância entre os modelos globais utilizados, corroboram com os resultados de outros autores. O clima mais úmido no SES, por exemplo, é afirmado por Almazroui *et al.* (2021), Avila-Diaz *et al.* (2023), Marengo *et al.* (2021), Ortega *et al.* (2021), Da Silva, Da Rocha, e Nunes (2025), e Torres *et al.* (2021). A redução pluviométrica projetada para o NSA também é indicada nos estudos de Marengo *et al.* (2023), Reboita *et al.* (2022), Almazouri *et al.* (2021), Ortega *et al.* (2021) e Bazzanella (2025). O clima mais seco identificado no SWS concorda com as projeções de Marengo *et al.* (2023), Torres *et al.* (2021), Almazouri *et al.* (2021), e Bambach *et al.* (2021). Com base nos resultados mencionados, esta pesquisa acrescenta que as regiões onde não há concordância com relação ao sinal da mudança na precipitação são aquelas que apresentam alterações pluviométricas pouco expressivas (com variação entre -5% e +5%).

No que diz respeito ao aquecimento na AS, há destaque para o aumento drástico na temperatura nos setores NSA e SAM, como também apontado por Marengo *et al.* (2023), Torres *et al.* (2021), Almazroui *et al.* (2021), Ortega *et al.* (2021) e Moraes, Wanderley e Delgado (2023). Por conseguinte, a distribuição espacial e a intensidade do aquecimento na AS configuram resultados consistentes com os demais trabalhos.

A Figura 17 sintetiza as mudanças mais significativas projetadas nas regiões brasileiras no fim do século XXI sob cenário SSP5-8.5. Para a precipitação, a cor do símbolo utilizado para representar a chuva (nuvem) está relacionada com a predominância do sinal da mudança pluviométrica ao longo do ano (ver painel inferior da Tabela B.1 do Apêndice B). Já os valores contidos no símbolo correspondem às medianas do conjunto (Figuras 5 a 9) para os meses que apresentam clima mais seco (topo) e clima mais úmido (base). No caso da temperatura, foram consideradas as médias anuais do conjunto (painel inferior da Tabela D.1 do Apêndice D). Nota-se um aquecimento mais drástico nas regiões N e CO, com

temperaturas que chegam a $+5^{\circ}\text{C}$. Há expressivo aumento pluviométrico na Região S (acima dos 40%), enquanto na Região NE ocorre redução que ultrapassa os 50%.

Figura 17 - Resumo do comportamento das mudanças mais relevantes projetadas pelo conjunto TOP10-CMIP6-AS para temperatura e precipitação entre 2081 e 2100 sob cenário SSP5-8.5. No mapa, as áreas estão coloridas de acordo com a intensidade (alta, média ou baixa) do aquecimento, e os valores contidos na legenda correspondem às médias anuais das regiões brasileiras. O símbolo de nuvem verde (marrom) demonstra aumento (redução) na precipitação para cada região baseado no sinal da mudança que predomina ao longo do ano. Os valores contidos nas nuvens representam as medianas mensais expostas nos boxplots regionais, juntamente com os meses que apresentam menos (topo) e mais (base) chuva.



Fonte: Autoria própria (2025).

De forma geral, os modelos apresentam alta concordância entre si com relação ao aquecimento em território brasileiro, sendo que as mudanças mensais e regionais mais drásticas são projetadas sob o cenário de alta emissão, como exibido nas Figuras 12 a 16. Em contrapartida, nota-se similaridade na dispersão dos dados projetados pelo TOP10-CMIP6-AS sob ambos os cenários para as mudanças na precipitação mensal (Figuras 5 a 9), com exceção de junho nas regiões SE e S.

Em território brasileiro, a Região NE apresenta, ao fim do século e sob ambos os cenários, menor dispersão entre as projeções mensais dos modelos, como demonstrado na

Figura 6. Os modelos projetam para as regiões, sob ambos os cenários (ver painel inferior da Tabela B.1 do Apêndice B), um clima mais seco entre agosto e outubro (exceto no S), e um clima mais úmido em dezembro (com exceção da Região N sob o cenário SSP5-8.5).

Com relação à mudança na temperatura média do ar entre 2081-2100, as regiões N e CO do Brasil, (cujos territórios estão majoritariamente contidos nos setores NSA e SAM da AS, respectivamente) são as que mais aquecem sob ambos os cenários (ver painel inferior da Tabela D.1 do Apêndice D). Sobre o comportamento mensal do TOP10-CMIP6-AS, a menor dispersão entre os dados projetados pelos modelos é encontrada na Região NE (Figura 13) sob SSP2-4.5, e nas regiões NE, SE e S (Figuras 13, 15 e 16, respectivamente) sob o cenário SSP5-8.5.

Em síntese, a expectativa é que tais projeções climáticas do território brasileiro possam colaborar para o aprimoramento de projetos de mitigação, adaptação e enfrentamento às mudanças climáticas no Brasil.

REFERÊNCIAS

- ALMAZROUI, M. *et al.* **Assessment of CMIP6 performance and projected temperature and precipitation changes over South America.** *Earth Systems and Environment*, [s. l.], v. 5, p. 155–183, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00233-6>.
- ALVARES, Clayton Alcarde *et al.* **Köppen's climate classification map for Brazil.** *Meteorologische Zeitschrift*, [s. l.], v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.
- AVILA-DIAZ, A. *et al.* **Current and future climate extremes over Latin America and Caribbean: assessing Earth System Models from High Resolution Model Intercomparison Project (HighResMIP).** *Earth Systems and Environment*, [s. l.], v. 7, p. 99–130, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41748-022-00337-7>.
- BAMBACH, Nicolas E. *et al.* **Projecting climate change in South America using variable-resolution community Earth system model: an application to Chile.** *International Journal of Climatology*, [s. l.], v. 42, n. 4, p. 2514–2542, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.7379>.
- BAZZANELA, A. C. *et al.* **Performance of CMIP6 models over South America.** *Climate Dynamics*, [s. l.], v. 62, p. 1501–1516, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00382-023-06979-1>.
- BAZZANELA, Anna Carolina Fernandes. **Extremos Climáticos na Amazônia Legal Brasileira: Clima Presente e Projeções.** Rio de Janeiro, f. 93, 2025 Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Meteorologia - Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2025. Disponível em: <http://objdig.ufrj.br/10/dissert/959099.pdf>.
- Bozkurt, D., Rojas, M., Boisier, J.P. *et al.* **Projected hydroclimate changes over Andean basins in central Chile from downscaled CMIP5 models under the low and high emission scenarios.** *Climatic Change* 150, 131–147 (2018). DOI: <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2246-7>.
- BRASIL. Ministério das Relações Exteriores. **O Brasil: geografia.** Disponível em: <https://www.gov.br/mre/pt-br/embaixada-bogota/o-brasil/geografia>. Acesso em: 27 mar. 2025.
- BRASIL. **Lei nº 14.904, de 27 de junho de 2024.** Estabelece normas gerais para a elaboração de planos de adaptação à mudança do clima. *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, 27 jun. 2024. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/L14904.htm. Acesso em: 21 mar. 2025.
- BRÊDA, J. P. L. F. *et al.* **Assessing extreme precipitation from a regional climate model in different spatial temporal scales: a hydrological perspective in South America.** *International Journal of Climatology*, [s. l.], v. 42, n. 16, p. 8904–8927, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.7782>.

BYRNE, M. P. *et al.* **Response of the Intertropical Convergence Zone to climate change: location, width, and strength.** *Current Climate Change Reports*, [s. l.], v. 4, p. 355–370, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40641-018-0110-5>.

CANADIAN CENTRE FOR CLIMATE SERVICES. **CMIP6 technical notes.** 2023. Disponível em: <https://climate-scenarios.canada.ca/?page=cmip6-technical-notes>. Acesso em: 19 mai. 2025.

COLLAZO, S.; BARRUCAND, M.; RUSTICUCCI, M. **Hot and dry compound events in South America: present climate and future projections, and their association with the Pacific Ocean.** *Natural Hazards*, [s. l.], v. 119, p. 299–323, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-023-06119-2>.

COLLINS, Jennifer M.; CHAVES, Rosane Rodrigues; DA SILVA MARQUES, Valdo. **Temperature variability over South America.** *Journal of Climate*, [s. l.], v. 22, n. 22, p. 5854–5869, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2551.1>.

CORREA, Wesley de Souza Campos *et al.* **Avaliação das simulações de temperatura e precipitação de um subconjunto de modelos do CMIP6 para o Brasil.** *Derbyana*, [s. l.], v. 43, p. e774, 2022. DOI: 10.14295/derb.v43.774.

DA SILVA, Nilson Oliveira; DA ROCHA, Rosmeri Porfírio; NUNES, Ana Maria Pereira. **Unraveling the coupled HighResMIP-CMIP6 models resolution impacts in present climate and future projections of water availability over South America.** *Frontiers in Earth Science*, [s. l.], v. 13, p. 1537081, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3389/feart.2025.1537081>.

DERECZYNSKI, C. *et al.* **Downscaling of climate extremes over South America – Part I: model evaluation in the reference climate.** *Weather and Climate Extremes*, [s. l.], v. 29, p. 100273, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wace.2020.100273>.

MORAES, J. B.; WANDERLEY, H. S.; DELGADO, R. C. **Areas susceptible to desertification in Brazil and projected climate change scenarios.** *Natural Hazards*, [s. l.], v. 116, p. 1463–1483, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05724-x>.

EIDT, R. C. **The climatology of South America.** In: FITTKAU, E. J.; ILLIES, J.; KLINGE, H.; SCHWABE, G. H.; SIOLI, H. (eds.). *Biogeography and ecology in South America*. Dordrecht: Springer, 1969. (Monographiæ Biologicæ, v. 18). DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-011-9731-1_3.

EYRING, V.; BONY, S.; MEEHL, G. A.; SENIOR, C. A.; STEVENS, B.; STOUFFER, R. J.; TAYLOR, K. E. **Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization.** *Geoscientific Model Development*, [s. l.], v. 9, p. 1937–1958, 2016. DOI: <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>.

FERREIRA, G. W. S.; REBOITA, M. S. **A new look into the South America precipitation regimes: observation and forecast.** *Atmosphere*, [s. l.], v. 13, n. 873, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos13060873>.

GAN, Manoel Alonso; RAO, Vadlamudi Brahmananda. Surface cyclogenesis over south America. **Monthly Weather Review**, v. 119, n. 5, p. 1293–1302, 1991. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1991\)119<1293:SCOSA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1991)119<1293:SCOSA>2.0.CO;2).

GARREUD, R. D. *et al.* **Present-day South American climate.** *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, [s. l.], v. 281, n. 3–4, p. 180–195, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2007.10.032>.

GIORGI, Filippo; MEARNNS, Linda O. **Calculation of average, uncertainty range, and reliability of regional climate changes from AOGCM simulations via the “reliability ensemble averaging” (REA) method.** *Journal of Climate*, [s. l.], v. 15, n. 10, p. 1141–1158, maio 2002. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015%3C1141:COAURA%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015%3C1141:COAURA%3E2.0.CO;2).

GUTIÉRREZ, J.M., R.G. Jones, G.T. Narisma, L.M. Alves, M. Amjad, I.V. Gorodetskaya, M. Grose, N.A.B. Klutse, S. Krakovska, J. Li, D. Martínez-Castro, L.O. Mearns, S.H. Mernild, T. Ngo-Duc, B. van den Hurk, and J.-H. Yoon, 2021: Atlas. In **Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**[Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1927–2058, doi: 10.1017/9781009157896.021.

GRIMM, A. (2009): Cap. 22, **Variabilidade interanual do clima no Brasil.** In: *Tempo e Clima no Brasil*. Eds: Cavalcanti, I.F.A., Ferreira, N.J., Justi da Silva, M.G., Silva Dias, M.A.F.

HAYLOCK, M. R. *et al.* **Trends in total and extreme South American rainfall in 1960–2000 and links with sea surface temperature.** *Journal of Climate*, [s. l.], v. 19, n. 8, p. 1490–1512, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1175/JCLI3695.1>.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Área territorial 2023. Brasil | Cidades e Estados.** Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/panorama>. Acesso em: 01 abr. 2025.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** In: MASSON-DELMOTTE, V. *et al.* (eds.). Cambridge: Cambridge University Press, 2021. DOI: 10.1017/9781009157896.

LUIZ SILVA, W. *et al.* **Temperature and Precipitation Extremes in the Brazilian Legal Amazon: A Summary of Climatological Patterns and Detected Trends.** *Atmosphere*, v. 16, p. 222, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos16020222>.

MARENGO, J. A. *et al.* **Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modeling system.** *International Journal of Climatology*, [s. l.], v. 29, p. 2241–2255, 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/joc.1863>.

MARENGO, J. A. *et al.* **Extreme Rainfall and Hydro-Geo-Meteorological Disaster Risk in 1.5, 2.0, and 4.0°C Global Warming Scenarios: An Analysis for Brazil.** *Frontiers in Climate*, v.3, p. 610433, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3389/fclim.2021.610433>.

MARENGO, J.A. *et al.* **Increased climate pressure on the agricultural frontier in the Eastern Amazonia–Cerrado transition zone.** *Sci Rep* 12, 457 (2022). DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-04241-4>.

MARENGO, J.A. *et al.* (2023). **Climate Variability and Change in Tropical South America.** In: Dominguez, J.M.L., Kikuchi, R.K.P.d., Filho, M.C.d.A., Schwaborn, R., Vital, H. (eds) *Tropical Marine Environments of Brazil. The Latin American Studies Book Series.* Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-21329-8_2.

MEDEIROS, F. J. de; OLIVEIRA, C. P.; AVILA-DIAZ, A. **Evaluation of extreme precipitation climate indices and their projected changes for Brazil: from CMIP3 to CMIP6.** *Weather and Climate Extremes*, [s. l.], v. 38, p. 100511, dez. 2022. DOI: 10.1016/j.wace.2022.100511.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima: Volume I – Estratégia Geral.** Brasília: MMA, 2016. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/biodiversidade-e-biomas/biomas-e-ecossistemas/biomas/arquivos-biomas/plano-nacional-de-adaptacao-a-mudanca-do-clima-pna-vol-i.pdf>. Acesso em: 19 mar. 2025.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Revista Adaptação à Mudança do Clima.** Brasília: MMA, v. 1, n. 1, jun. 2016. Disponível em: https://antigo.mma.gov.br/images/arquivo/80182/Revista%20Adaptacao_WEB.pdf. Acesso em: 21 mar. 2025.

MONTEIRO DOS SANTOS, D. *et al.* **Twenty-first-century demographic and social inequalities of heat-related deaths in Brazilian urban areas.** *PLoS ONE*, [s. l.], v. 19, n. 1, e0295766, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0295766>.

NOBRE, Carlos A. *et al.* **Land-use and climate change risks in the Amazon and the need of a novel sustainable development paradigm.** *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 113, n. 39, p. 10759-10768, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1605516113>.

OLIVEIRA, Alda Santos. **Interações entre sistemas frontais na América do Sul e a convecção da Amazônia.** 1986. Tese de Doutorado. INPE.

OLIVEIRA, Debora Martins *et al.* **Performance dos modelos climáticos do CMIP6 em simular a precipitação em subdomínios da América do Sul no período histórico.** *Revista Brasileira de Geografia Física*, [s. l.], v. 16, n. 1, p. 116–133, 2023. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/download/255100/43161>. Acesso em: 7 abr. 2025.

PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. **Python 3.11 Documentation.** [s. l.]: Python Software Foundation, 2024. Disponível em: <https://docs.python.org/3.11/>. Acesso em: 20 fev. 2025.

REBOITA, Michelle Simões *et al.* **Entendendo o tempo e o clima na América do Sul.** Terra e Didática, Campinas, SP, v. 8, n. 1, p. 34–50, 2015. DOI: 10.20396/td.v8i1.8637425.

REBOITA, Michelle Simões *et al.* **Future projections of extreme precipitation climate indices over South America based on CORDEX-CORE multimodel ensemble.** *Atmosphere*, v. 13, n. 9, p. 1463, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos13091463>.

REGOTO, Pedro *et al.* **Observed changes in air temperature and precipitation extremes over Brazil.** *International Journal of Climatology*, v. 41, n. 11, p. 5125-5142, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.7119>.

RIAH, Keywan *et al.* **The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: an overview.** *Global Environmental Change*, [s. l.], v. 42, p. 153–168, 2017. ISSN 0959-3780. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>.

SANTOS, Valdiléa G. V. dos; WAKIMOTO, Mayumi; NERY, Tiago. **Saúde e mudanças climáticas: contradições entre capitalismo, meio ambiente e saúde pública.** In: OBSERVATÓRIO INTERDISCIPLINAR DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS (UERJ). *Cadernos do OIMC*, Rio de Janeiro, v. 16, 2025. ISSN 2764-1120. Disponível em: <https://obsinterclima.eco.br/wp-content/uploads/2025/02/Caderno-16-2025-2.pdf>. Acesso em: 1 abr. 2025.

SATYAMURTY, P.; NOBRE, C. A.; SILVA DIAS, P. L. **South America.** In: KAROLY, D. J.; VINCENT, D. G. (eds.). *Meteorology of the Southern Hemisphere*. Meteorological Monographs. Boston, MA: American Meteorological Society, 1998. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-935704-10-2_5.

SIQUEIRA, Anderlan Henrique Batista. **Variabilidade do clima da América do Sul e sua relação com os índices oceânicos e atmosféricos.** Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2012. 77 f. Disponível em: <https://www.repositorio.ufal.br/handle/riufal/2065>. Acesso em: 4 abr. 2025.

TORRES, Roger Rodrigues *et al.* **Projected impacts of 1.5 and 2 °C global warming on temperature and precipitation patterns in South America.** *International Journal of Climatology*, [s. l.], v. 42, n. 3, p. 1597–1611, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.7322>.

APÊNDICE A – MUDANÇAS NA PRECIPITAÇÃO PROJETADAS INDIVIDUALMENTE PARA AS REGIÕES DO BRASIL

Tabela A.1 - Dados da mudança na precipitação total, em %, projetada pelos modelos do TOP10-CMIP6-AS para as regiões Norte, Nordeste, Centro-Oeste, Sudeste e Sul, respectivamente, entre 2081-2100. As informações em negrito correspondem aos valores mínimo e máximo encontrados para determinado cenário e mês, e que estão associados à alta variabilidade do conjunto.

Região Norte										
Mês	Agosto									
Modelo	ACCESS-ESM1-5	CMCC-E SM2	CNRM-E SM2-1	EC-EAR TH3	INM-CM 5-0	KACE-1 0-G	MIROC6	MPI-ES M1-2-HR	MRI-ES M2-0	TAIESM 1
SSP2-4.5	-36,8	-34,5	+21,1	-26,8	-11,0	-3,3	-11,5	-9,1	-2,6	-45,1
Mês	Setembro									
Modelo	ACCESS-ESM1-5	CMCC-E SM2	CNRM-E SM2-1	EC-EAR TH3	INM-CM 5-0	KACE-1 0-G	MIROC6	MPI-ES M1-2-HR	MRI-ES M2-0	TAIESM 1
SSP2-4.5	-38,5	-35,3	-27,8	-27,8	-8,8	+2,2	+0,6	-4,2	-14,9	-40,1
SSP5-8.5	-57,3	-42,4	-82,5	-59,1	-8,3	-14,9	-14,7	-57,9	-19,3	-69,4
Mês	Outubro									
Modelo	ACCESS-ESM1-5	CMCC-E SM2	CNRM-E SM2-1	EC-EAR TH3	INM-CM 5-0	KACE-1 0-G	MIROC6	MPI-ES M1-2-HR	MRI-ES M2-0	TAIESM 1
SSP5-8.5	-47,0	-36,2	-70,0	-52,3	-0,1	-21,2	+3,6	-54,7	-17,2	-56,5
Região Nordeste										
Mês	Maio									
Modelo	ACCESS-ESM1-5	CMCC-E SM2	CNRM-E SM2-1	EC-EAR TH3	INM-CM 5-0	KACE-1 0-G	MIROC6	MPI-ES M1-2-HR	MRI-ES M2-0	TAIESM 1
SSP2-4.5	-20,5	-29,5	-11,9	-5,1	-28,8	+30,2	+22,0	+1,8	+12,4	-12,0
Mês	Setembro									
Modelo	ACCESS-ESM1-5	CMCC-E SM2	CNRM-E SM2-1	EC-EAR TH3	INM-CM 5-0	KACE-1 0-G	MIROC6	MPI-ES M1-2-HR	MRI-ES M2-0	TAIESM 1

Região Sudeste										
Mês	Junho									
Modelo	ACCESS-ESM1-5	CMCC-ESM2	CNRM-ESM2-1	EC-EARTH3	INM-CM5-0	KACE-10-G	MIROC6	MPI-ESM1-2-HR	MRI-ESM2-0	TAI-ESM1
SSP5-8.5	+6,0	-8,2	-14,7	+100,3	-21,2	+58,7	+146,6	+44,4	+48,7	+5,7
Mês	Setembro									
Modelo	ACCESS-ESM1-5	CMCC-ESM2	CNRM-ESM2-1	EC-EARTH3	INM-CM5-0	KACE-10-G	MIROC6	MPI-ESM1-2-HR	MRI-ESM2-0	TAI-ESM1
SSP2-4.5	-51,7	-51,3	-5,9	-18,5	-44,6	+32,5	+5,6	-40,9	+28,1	-53,6
SSP5-8.5	-52,9	-61,8	-41,7	-47,4	-52,1	+4,9	-7,3	-64,9	+17,2	-61,3
Região Sul										
Mês	Maio									
Modelo	ACCESS-ESM1-5	CMCC-ESM2	CNRM-ESM2-1	EC-EARTH3	INM-CM5-0	KACE-10-G	MIROC6	MPI-ESM1-2-HR	MRI-ESM2-0	TAI-ESM1
SSP5-8.5	+71,0	+17,2	+41,4	+72,0	+8,7	+31,2	+88,1	+42,3	+26,2	+68,4
Mês	Junho									
Modelo	ACCESS-ESM1-5	CMCC-ESM2	CNRM-ESM2-1	EC-EARTH3	INM-CM5-0	KACE-10-G	MIROC6	MPI-ESM1-2-HR	MRI-ESM2-0	TAI-ESM1
SSP2-4.5	-2,4	+2,1	+24,4	+46,1	+14,9	+17,7	+51,4	+4,6	+30,8	+48,5
SSP5-8.5	+21,6	+22,6	+47,8	+84,3	+31,6	+32,5	+97,7	+20,9	+75,3	+69,0
Mês	Agosto									
Modelo	ACCESS-ESM1-5	CMCC-ESM2	CNRM-ESM2-1	EC-EARTH3	INM-CM5-0	KACE-10-G	MIROC6	MPI-ESM1-2-HR	MRI-ESM2-0	TAI-ESM1
SSP2-4.5	+6,8	-21,6	+30,6	-8,7	-28,1	+13,3	+1,8	+20,3	+30,1	-14,3
SSP5-8.5	+39,7	-20,2	+24,4	+33,6	-5,3	+30,5	-8,0	+17,4	+35,6	-18,2

Fonte: Autoria própria (2025).

APÊNDICE B - MUDANÇA PERCENTUAL NA PRECIPITAÇÃO TOTAL
PROJETADA PELO CONJUNTO PARA AS REGIÕES DO BRASIL

Tabela B.1 - Mudança na precipitação (%) média mensal dos períodos 2041-2060 e 2081-2100, relativo ao período 1995-2014, sob cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 para as regiões Norte, Nordeste, Centro-Oeste, Sudeste e Sul do Brasil.

Região	Cenário	2041-2060												
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Ano
Norte	SSP2-4.5	+0,5	-4,4	-3,7	+1,5	-1,5	-2,6	-7,1	-18,3	-15,3	-10,8	-1,1	+2,8	-2,7
	SSP5-8.5	-1,0	-8,9	-5,3	-0,9	-1,0	-1,2	-7,6	-20,8	-17,6	-13,7	-3,0	+2,5	-4,3
Nordeste	SSP2-4.5	+10,6	+6,7	+1,6	-2,3	-11,4	-10,2	-8,4	-13,2	-31,1	-35,9	-3,6	+6,8	+1,3
	SSP5-8.5	+13,9	+7,4	+0,2	-1,7	-5,9	-9,5	-12,9	-16,9	-28,7	-29,8	-9,6	+3,6	+1,5
Centro-Oeste	SSP2-4.5	+5,3	+5,5	+1,6	-1,9	-6,3	-7,3	-9,6	-27,3	-31,0	-12,8	+0,5	+2,4	+0,4
	SSP5-8.5	+4,4	+3,5	-0,2	-0,1	+2,4	+14,8	-17,6	-25,5	-30,1	-16,6	-0,5	+1,9	-0,5
Sudeste	SSP2-4.5	+3,9	+8,3	+3,2	-0,8	+1,2	+2,0	-1,8	-16,7	-21,9	-6,7	-2,4	+5,6	+1,6
	SSP5-8.5	+6,6	+6,8	+3,0	+1,6	+6,9	+13,0	-4,2	-9,9	-15,6	-14,8	+2,2	+4,9	+2,4
Sul	SSP2-4.5	+1,8	-4,6	+9,2	+16,2	+16,9	+6,4	+7,1	+1,3	+1,6	+10,9	+9,9	+2,1	+5,9
	SSP5-8.5	-0,5	+1,9	+14,0	+16,6	+19,3	+17,7	+7,6	+3,9	-0,2	+12,0	+9,8	+3,2	+7,7
Região	Cenário	2081-2100												
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Ano
Norte	SSP2-4.5	-0,8	-6,7	-1,0	0,0	-0,9	-1,8	-7,1	-17,5	-16,2	-10,7	-2,6	+0,7	-3,3
	SSP5-8.5	-6,0	-12,6	-8,9	-1,3	-2,3	-9,1	-21,9	-35,1	-33,9	-29,0	-10,5	-4,5	-10,3
Nordeste	SSP2-4.5	+9,8	+6,5	+1,7	-1,9	-9,8	-14,8	-12,7	-15,2	-32,9	-42,8	-14,0	+6,5	+0,4
	SSP5-8.5	+12,9	+5,7	-1,2	-6,9	-20,3	-31,4	-27,9	-30,4	-47,2	-51,3	-21,6	+0,5	-3,3

Centro-Oeste	SSP2-4.5	+6,8	+3,0	-0,8	+0,7	+5,0	+0,3	-17,3	-30,5	-30,8	-15,0	+1,9	+2,3	+0,2
	SSP5-8.5	+8,3	+4,5	+1,8	+2,3	+8,2	+23,9	-5,9	-43,4	-47,4	-28,2	-1,9	+5,1	+0,1
Sudeste	SSP2-4.5	+7,2	+9,0	+2,0	+0,4	+8,6	+2,3	-2,6	-15,2	-20,7	-13,4	+4,1	+4,8	+2,6
	SSP5-8.5	+10,5	+9,2	+11,8	+4,4	+8,2	+30,7	+4,5	-22,3	-37,1	-18,6	-2,7	+8,3	+4,0
Sul	SSP2-4.5	+4,6	+1,1	+9,0	+17,6	+19,8	+20,8	+11,9	+5,7	+4,8	+18,4	+18,2	+9,1	+11,2
	SSP5-8.5	+6,8	+8,4	+15,6	+30,9	+46,4	+46,0	+29,0	+17,2	+5,4	+23,2	+33,5	+19,5	+21,4

Fonte: Autoria própria (2025).

APÊNDICE C - MUDANÇAS NA TEMPERATURA MÉDIA PROJETADAS INDIVIDUALMENTE PARA AS REGIÕES DO BRASIL

Tabela C.1 - Dados da mudança na temperatura média do ar, em °C, projetada pelos modelos do TOP10-CMIP6-AS para as regiões Norte, Nordeste, Centro-Oeste e Sul, respectivamente, entre 2081-2100. As informações em negrito correspondem aos valores mínimo e máximo encontrados para determinado cenário e mês e que estão associados à alta variabilidade do conjunto.

Região Norte										
Mês	Janeiro									
Modelo	ACCESS-ESM1-5	CMCC-E SM2	CNRM-E SM2-1	EC-EAR TH3	INM-CM 5-0	KACE-1 0-G	MIROC6	MPI-ES M1-2-HR	MRI-ES M2-0	TAIESM 1
SSP2-4.5	+3,0	+2,3	+2,5	+2,3	+1,1	+3,2	+1,4	+1,4	+1,9	+3,6
SSP5-8.5	+5,8	+4,3	+5,2	+4,1	+2,2	+6,2	+3,3	+3,3	+3,5	+7,7
Região Nordeste										
Mês	Agosto									
Modelo	ACCESS-ESM1-5	CMCC-E SM2	CNRM-E SM2-1	EC-EAR TH3	INM-CM 5-0	KACE-1 0-G	MIROC6	MPI-ES M1-2-HR	MRI-ES M2-0	TAIESM 1
SSP2-4.5	+4,2	+2,9	+2,7	+3,0	+1,9	+3,4	+2,3	+1,8	+2,0	+4,6
SSP5-8.5	+6,8	+6,2	+8,0	+7,6	+3,0	+6,8	+4,4	+6,5	+4,5	+9,9
Mês	Outubro									
Modelo	ACCESS-ESM1-5	CMCC-E SM2	CNRM-E SM2-1	EC-EAR TH3	INM-CM 5-0	KACE-1 0-G	MIROC6	MPI-ES M1-2-HR	MRI-ES M2-0	TAIESM 1
SSP5-8.5	+4,5	+4,9	+5,3	+3,7	+2,7	+5,2	+4,0	+3,5	+3,6	+6,0
Mês	Junho									
Modelo	ACCESS-ESM1-5	CMCC-E SM2	CNRM-E SM2-1	EC-EAR TH3	INM-CM 5-0	KACE-1 0-G	MIROC6	MPI-ES M1-2-HR	MRI-ES M2-0	TAIESM 1

SSP5-8.5	+4,3	+5,0	+5,5	+4,3	+2,8	+5,5	+4,8	+3,7	+3,4	+6,0
Mês	Dezembro									
Modelo	ACCESS-ESM1-5	CMCC-E SM2	CNRM-E SM2-1	EC-EAR TH3	INM-CM 5-0	KACE-1 0-G	MIROC6	MPI-ES M1-2-HR	MRI-ES M2-0	TAIESM 1
SSP2-4.5	+2,3	+3,0	+2,3	+3,1	+1,1	+2,2	+2,2	+1,8	+1,5	+3,5
Região Centro-Oeste										
Mês	Março									
Modelo	ACCESS-ESM1-5	CMCC-E SM2	CNRM-E SM2-1	EC-EAR TH3	INM-CM 5-0	KACE-1 0-G	MIROC6	MPI-ES M1-2-HR	MRI-ES M2-0	TAIESM 1
SSP5-8.5	+4,7	+4,3	+5,7	+4,3	+2,6	+5,6	+3,1	+3,2	+3,4	+6,1
Mês	Maio									
Modelo	ACCESS-ESM1-5	CMCC-E SM2	CNRM-E SM2-1	EC-EAR TH3	INM-CM 5-0	KACE-1 0-G	MIROC6	MPI-ES M1-2-HR	MRI-ES M2-0	TAIESM 1
SSP5-8.5	+6,5	+6,1	+7,4	+4,1	+3,8	+5,8	+3,5	+4,1	+3,9	+7,0
Mês	Outubro									
Modelo	ACCESS-ESM1-5	CMCC-E SM2	CNRM-E SM2-1	EC-EAR TH3	INM-CM 5-0	KACE-1 0-G	MIROC6	MPI-ES M1-2-HR	MRI-ES M2-0	TAIESM 1
SSP2-4.5	+4,6	+5,0	+3,7	+4,5	+2,0	+3,2	+2,4	+2,9	+2,3	+5,4
SSP5-8.5	+7,4	+7,9	+7,8	+10,4	+3,9	+7,4	+4,7	+6,4	+5,5	+9,2
Região Sudeste										
Mês	Março									
Modelo	ACCESS-ESM1-5	CMCC-E SM2	CNRM-E SM2-1	EC-EAR TH3	INM-CM 5-0	KACE-1 0-G	MIROC6	MPI-ES M1-2-HR	MRI-ES M2-0	TAIESM 1
SSP2-4.5	+2,3	+1,9	+3,4	+1,8	+1,5	+3,2	+1,2	+1,5	+1,5	+3,0
SSP5-8.5	+4,3	+3,7	+5,5	+3,6	+2,3	+5,0	+2,4	+3,2	+3,3	+4,8

Mês	Maio									
Modelo	ACCESS-ESM1-5	CMCC-ESM2	CNRM-ESM2-1	EC-EARTH3	INM-CM5-0	KACE-10-G	MIROC6	MPI-ESM1-2-HR	MRI-ESM2-0	TAI-ESM1
SSP5-8.5	+7,9	+5,3	+6,0	+4,1	+3,6	+5,2	+2,9	+3,9	+3,5	+5,4
Mês	Outubro									
Modelo	ACCESS-ESM1-5	CMCC-ESM2	CNRM-ESM2-1	EC-EARTH3	INM-CM5-0	KACE-10-G	MIROC6	MPI-ESM1-2-HR	MRI-ESM2-0	TAI-ESM1
SSP2-4.5	+3,4	+4,2	+3,1	+3,5	+2,1	+3,0	+1,5	+2,4	+2,2	+4,3
SSP5-8.5	+5,5	+6,8	+6,2	+7,8	+4,1	+6,4	+3,3	+4,8	+4,7	+7,2
Mês	Novembro									
Modelo	ACCESS-ESM1-5	CMCC-ESM2	CNRM-ESM2-1	EC-EARTH3	INM-CM5-0	KACE-10-G	MIROC6	MPI-ESM1-2-HR	MRI-ESM2-0	TAI-ESM1
SSP5-8.5	+5,2	+5,8	+4,8	+7,4	+3,5	+5,1	+2,9	+3,9	+4,9	+6,0
Região Sul										
Mês	Fevereiro									
Modelo	ACCESS-ESM1-5	CMCC-ESM2	CNRM-ESM2-1	EC-EARTH3	INM-CM5-0	KACE-10-G	MIROC6	MPI-ESM1-2-HR	MRI-ESM2-0	TAI-ESM1
SSP5-8.5	+4,2	+4,4	+4,9	+3,5	+2,7	+4,8	+2,6	+2,8	+3,5	+5,0
Mês	Maio									
Modelo	ACCESS-ESM1-5	CMCC-ESM2	CNRM-ESM2-1	EC-EARTH3	INM-CM5-0	KACE-10-G	MIROC6	MPI-ESM1-2-HR	MRI-ESM2-0	TAI-ESM1
SSP2-4.5	+1,9	+2,3	+2,3	+2,6	+0,9	+2,3	+1,2	+0,9	+1,0	+2,5
SSP5-8.5	+4,4	+4,8	+4,9	+3,7	+2,4	+4,5	+2,0	+2,4	+2,6	+5,0

Fonte: Autoria própria (2025).

APÊNDICE D - MUDANÇA NA TEMPERATURA MÉDIA PROJETADA PELO CONJUNTO PARA AS REGIÕES DO BRASIL

Tabela D.1 - Mudança na temperatura do ar (°C) média mensal dos períodos 2041-2060 e 2081-2100, relativo ao período 1995-2014, sob cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 para as regiões Norte, Nordeste, Centro-Oeste, Sudeste e Sul do Brasil.

Região	Cenário	2041-2060												
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Ano
Norte	SSP2-4.5	+1,4	+1,5	+1,5	+1,3	+1,4	+1,5	+1,7	+1,9	+2,1	+2,0	+1,6	+1,3	+1,6
	SSP5-8.5	+1,9	+2,1	+2,1	+1,9	+1,8	+2,0	+2,2	+2,6	+2,8	+2,8	+2,2	+1,8	+2,2
Nordeste	SSP2-4.5	+1,2	+1,2	+1,3	+1,3	+1,3	+1,3	+1,3	+1,2	+1,4	+1,7	+1,7	+1,4	+1,4
	SSP5-8.5	+1,6	+1,6	+1,7	+1,6	+1,8	+1,9	+1,8	+1,7	+1,9	+2,2	+2,3	+1,9	+1,8
Centro-Oeste	SSP2-4.5	+1,4	+1,4	+1,5	+1,6	+1,6	+1,6	+1,5	+1,7	+2,3	+2,5	+1,7	+1,5	+1,7
	SSP5-8.5	+1,8	+1,8	+1,9	+2,0	+2,2	+2,1	+2,1	+2,4	+3,0	+3,3	+2,5	+1,9	+2,3
Sudeste	SSP2-4.5	+1,3	+1,2	+1,3	+1,3	+1,3	+1,2	+1,2	+1,4	+1,8	+1,9	+1,6	+1,3	+1,4
	SSP5-8.5	+1,7	+1,6	+1,7	+1,7	+1,8	+1,7	+1,7	+1,8	+2,2	+2,7	+2,2	+1,8	+1,9
Sul	SSP2-4.5	+1,2	+1,2	+1,3	+1,2	+1,2	+1,1	+1,1	+1,1	+1,3	+1,2	+1,0	+1,2	+1,2
	SSP5-8.5	+1,6	+1,6	+1,6	+1,5	+1,5	+1,4	+1,5	+1,6	+1,8	+1,7	+1,5	+1,6	+1,6
Região	Cenário	2081-2100												
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Ano
Norte	SSP2-4.5	+2,3	+2,5	+2,4	+2,2	+2,2	+2,3	+2,5	+2,9	+3,1	+3,0	+2,5	+2,2	+2,5
	SSP5-8.5	+4,5	+4,7	+4,7	+4,3	+4,3	+4,7	+5,2	+5,9	+6,3	+6,4	+5,2	+4,6	+5,1
Nordeste	SSP2-4.5	+2,1	+2,0	+2,0	+2,1	+2,2	+2,3	+2,3	+2,1	+2,3	+2,6	+2,8	+2,3	+2,3
	SSP5-8.5	+3,8	+3,8	+3,8	+4,0	+4,3	+4,5	+4,4	+4,2	+4,3	+4,9	+5,0	+4,4	+4,3
Centro-Oeste	SSP2-4.5	+2,2	+2,3	+2,4	+2,5	+2,6	+2,7	+2,6	+2,8	+3,5	+3,6	+2,7	+2,3	+2,7

	SSP5-8.5	+4,2	+4,2	+4,3	+4,7	+5,2	+5,1	+5,0	+5,3	+6,5	+7,1	+5,4	+4,5	+5,1
Sudeste	SSP2-4.5	+2,2	+2,1	+2,1	+2,2	+2,3	+2,2	+2,1	+2,3	+2,7	+3,0	+2,5	+2,1	+2,3
	SSP5-8.5	+3,8	+3,8	+3,8	+4,1	+4,5	+4,4	+4,2	+4,3	+5,1	+5,7	+4,9	+4,1	+4,4
Sul	SSP2-4.5	+2,0	+2,2	+2,1	+2,0	+1,8	+1,9	+1,9	+2,1	+2,2	+2,0	+1,8	+1,9	+2,0
	SSP5-8.5	+3,8	+3,9	+4,0	+3,8	+3,7	+3,3	+3,6	3,8	+4,2	+3,8	+3,5	+3,7	+3,8

Fonte: Autoria própria (2025).