

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

CARLOS HENRIQUE DE SOUZA

ÍNDICES DE EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO NO BRASIL: CLIMA
PRESENTE E PROJEÇÕES FUTURAS EM CENÁRIOS DE MUDANÇAS
CLIMÁTICAS

CURITIBA

2024

CARLOS HENRIQUE DE SOUZA

ÍNDICES DE EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO NO BRASIL: CLIMA
PRESENTE E PROJEÇÕES FUTURAS EM CENÁRIOS DE MUDANÇAS
CLIMÁTICAS

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Graduação em
Engenharia Ambiental, Setor de
Tecnologia, da Universidade Federal do
Paraná, como requisito parcial à obtenção
do título de Bacharel em Engenharia
Ambiental.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Camila Bertoletti
Carpenedo

Coorientador: Ricardo Peruzzo
Bernasconi

CURITIBA

2024



TERMO DE APROVAÇÃO DE PROJETO FINAL

CARLOS HENRIQUE DE SOUZA

ÍNDICES DE EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO NO BRASIL: CLIMA PRESENTE E PROJEÇÕES FUTURAS EM CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Projeto Final de Curso, aprovado como requisito parcial para a obtenção do Diploma de Bacharel em Engenharia Ambiental no Curso de Graduação em Engenharia Ambiental do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, com nota 88, pela seguinte banca examinadora:

Documento assinado digitalmente



CAMILA BERTOLETTI CARPENEDO
Data: 14/11/2024 11:37:26-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Orientador(a): _____

Camila Bertolletti Carpenedo
Departamento de Solos e Engenharia Agrícola/ UFPR

Ricardo Peruzzo Bernasconi

Co-orientador(a): _____

Ricardo Peruzzo Bernasconi
Irani Papel e Embalagem S.A.

Documento assinado digitalmente



LEILA LIMBERGER
Data: 14/11/2024 14:00:43-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Membro(a) 1: _____

Leila Limberger
Departamento de Geografia / UNIOESTE

Documento assinado digitalmente



MICHAEL MANNICH
Data: 18/11/2024 11:37:14-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Membro(a) 2: _____

Michael Mannich
Departamento de Engenharia Ambiental / UFPR

Documento assinado digitalmente



RICARDO HENRIQUE MORETON GODOI
Data: 18/11/2024 12:11:08-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Membro(a) 3: _____

Ricardo Henrique Moreton Godoi
Departamento de Engenharia Ambiental / UFPR

Signature: 

Email: ricardobernasconi@irani.com.br

"[...] É aqui. É nosso lar. Somos nós. Nele, todos que você ama, todos que você conhece, todos de quem você já ouviu falar, todo ser humano que já existiu, viveu sua vida. A totalidade de nossas alegrias e sofrimentos. Milhares de religiões, ideologias e doutrinas econômicas. Cada caçador e saqueador, cada herói e covarde, cada criador e destruidor da civilização, cada rei e plebeu, cada casal apaixonado, cada mãe e pai, cada crianças esperançosas, inventores e exploradores, cada educador, cada político, cada corrupto, cada superstar, cada líder supremo, cada santo e pecador na história da nossa espécie viveu ali, em um grão de poeira suspenso em um raio de sol. [...]Nosso planeta é um espécime solitário na grande e envolvente escuridão cósmica. Na nossa obscuridade, em toda essa vastidão, não há nenhum indício que ajuda possa vir de outro lugar para nos salvar de nós mesmos [...]."

SAGAN, Carl. **Pálido ponto azul: uma visão do futuro humano no espaço**. São Paulo: Companhia das Letras, 1994.

RESUMO

Eventos extremos climáticos são definidos como a ocorrência de uma variável meteorológica ou climática com intensidade superior ou inferior das faixas de valores observadas normalmente para estes eventos em um determinado local ou época do ano. Esses eventos vêm se intensificando ao longo das últimas décadas ao redor do globo, devido aos efeitos das mudanças climáticas, fenômeno com influência antropogênica. Neste contexto, inclui-se o Brasil, que dentre suas características principais, está a marcante dependência econômica no que diz respeito à produção agrícola e um alto nível de desigualdade social. Portanto, as secas e chuvas intensas têm efeitos negativos sobre a segurança alimentar do país e biodiversidade e a intensificação de conflitos sociais. Assim, o objetivo deste estudo foi avaliar índices de extremos de precipitação no clima presente e em projeções futuras em cenários de mudanças climáticas. Para os dados históricos, foram utilizados dados de precipitação pluvial diária (1980-2019), obtidas do CPC *Global Unified Gauge-Based Analysis of Daily Precipitation*. Para as projeções futuras, foram utilizados os índices de extremos de precipitação do ETCCDI/WMO para os experimentos históricos e os cenários SSP1-2.6 (otimista) e SSP5-8.5 (pessimista) do modelo EC-Earth3-Veg-LR do CMIP6 (*Couple Model Intercomparison Project Phase 6*) do IPCC. A aplicação dos índices climáticos sobre os dados históricos observados foi feita através do software *Climate Data Operators* (CDO) e foi realizada a análise de tendência e significância estatística através, respectivamente, do método Contextual de Mann-Kendall (CMK) e da curvatura de Sen. Além disso, foi avaliado o viés dos índices aplicados aos dados do modelo, pela comparação das projeções deste para o período histórico e os dados observados, no período entre 1981 e 2010. Os índices de extremos em cenários futuros de mudanças climáticas foram comparados com o período histórico do modelo, para avaliar mudanças futuras (2041-2070 e 2071-2100) em relação ao passado (1981-2010). Os resultados revelam um aumento no número de dias secos consecutivos e redução no número dias úmidos consecutivos, especialmente no Norte, Nordeste e Centro-Oeste do país, e revela aumento da frequência de chuvas intensas para a Região Sul. Além disso, as projeções futuras revelam uma intensificação dessas variações para os próximos anos, evidenciando a necessidade de ações que promovam a resiliência a esses eventos em todas as regiões do país.

LISTA DE SIGLAS

ANA – Agência Nacional de Água e Saneamento Básico

AR6 – *Sixth Assessment Report*

CDD – *Consecutive Dry Days*

CDO – *Climate Data Operators*

CMIP6 – *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6*

CWD – *Consecutive Wet Days*

CPC – *Climate Prediction Center*

CPTEC – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos

EC-Earth3-Veg-LR – *European Consortium - Earth System Model - Vegetation - Low Resolution*

ENOS – *El Niño - Oscilação Sul*

ETCCDI – *Expert Team on Climate Change Detection and Indices*

GEE – Gás do efeito estufa

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

IPCC – *Intergovernmental Pannel on Climate Change*

JCOMM – *Joint Technical Commision for Oceanography and Marine Meteorology*

NASA – *National Aeronautics and Space Administration*

NOAA – *National Oceanic and Atmospheric Administration*

PRCPTOT – *Total Precipitation*

R1mm - *Number of days with precipitation ≥ 1 mm*

R20mm - *Number of days with precipitation ≥ 20 mm*

RCP – *Representative Concentration Pathways*

SDII – *Simple Daily Intensity Index*

SSP – *Shared Socio-economic Pathways*

WCRP – *World Climate Research Program*

WMO – *World Meteorological Organization*

Sumário

1. INTRODUÇÃO	8
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
2.1. CARACTERIZAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO PLUVIAL NO BRASIL	10
2.2. PRECIPITAÇÃO PLUVIAL NO BRASIL EM UM CLIMA EM MUDANÇAS	12
3. MATERIAL E MÉTODOS	21
3.1. DADOS	21
3.2. MÉTODOS	23
4. RESULTADOS	25
4.1. ÍNDICES DE EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO: CLIMATOLOGIA, VARIABILIDADE E TENDÊNCIA.....	25
4.2. AVALIAÇÃO DOS ÍNDICES DE EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO: EC-Earth3- Veg-LR.....	39
4.3. ÍNDICES DE EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO: CENÁRIOS FUTUROS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS	42
5. CONCLUSÕES	54
REFERÊNCIAS	56

1. INTRODUÇÃO

O estudo de eventos climáticos extremos se tornou cada vez mais importante e isso está fortemente ligado ao fato de que a ocorrência destes eventos tem como possível consequência severos danos ambientais, sociais e econômicos. Associado a isso, existe o fato de haver uma detecção de que estes eventos têm aumentado em intensidade e frequência (IPCC, 2022). Como, por exemplo, a seca histórica na Região Sudeste do Brasil em 2014-2015, sendo o segundo evento com maiores perdas econômicas na América do Sul entre 1970-2019 (WMO, 2021), e que teve como consequência impactos negativos na disponibilidade de água para consumo humano, irrigação agrícola e na produção de energia hidrelétrica, fonte mais importante de produção energética no país (COELHO *et al.*, 2016).

Casos mais recentes, como a seca histórica na Amazônia no ano de 2023, são outra prova da capacidade que esses eventos têm de causar alterações agressivas em ambientes naturais, com corpos d'água, como o Rio Negro, atingindo níveis mínimos nunca antes registrados (CPTEC/INPE; INMET, 2023). Também neste ano foi observado, até o mês de setembro, a maior temperatura média global para os nove primeiros meses do ano, com valores de temperaturas médias mensais jamais registrada na história humana (NASA, 2023).

Dentre os fatores associados a tais mudanças estão a influência humana através da emissão de gases de efeito estufa, resultado de diversas atividades antrópicas e que têm forte relação com o aumento da temperatura média do planeta. Neste sentido, o Acordo de Paris (2015) aponta a necessidade de que haja um esforço internacional para manter o aumento da temperatura média global em até 1,5°C, o que já teria como consequência alterações nas dinâmicas globais e ecossistêmicas, e prevê que um aumento de 2°C traria alterações ambientais mais intensas e com maior potencial de irreversibilidade.

Neste contexto, a análise tanto dos padrões históricos quanto das projeções futuras relativos a extremos climáticos faz-se peça-chave para a compreensão dos impactos associados às alterações na frequência e intensidade destes eventos. Estudos regionais se mostram especialmente relevantes, pois permitem que sejam identificadas particularidades locais, tornando possível a elaboração de estratégias específicas de mitigação e adaptação. A escolha do Brasil como área de estudo é especialmente relevante por conta de sua vasta extensão territorial, pela sua

diversidade climática e pela sua importância global tanto em termos ambientais quanto econômicos. Destacam-se para o país as projeções do IPCC (2022), que apontam para um aumento da ocorrência de eventos extremos, com secas mais severas descritas para o Norte e Nordeste do país, enquanto o Sul tenderá a apresentar chuvas mais intensas, ameaçando tanto sistemas naturais quanto os sistemas humanos de tais regiões.

O Brasil desempenha um papel crucial no equilíbrio climático global, abrigando a maior floresta tropical do mundo, a Amazônia, exercendo assim influência direta na regulação do ciclo hidrológico e na captura de carbono. Por outro lado, as vulnerabilidades apontadas, relativas às mudanças climáticas, e a necessidade de estratégias consistentes de adaptação apontam para uma urgência para o aprofundamento de estudos referentes a eventos extremos. Tendo em vista a importância de se estudar a ocorrência de tais eventos, o presente estudo tem como objetivo avaliar a variabilidade e mudanças nos índices de extremos de precipitação no Brasil, no período histórico e em cenários futuros de mudanças climáticas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. CARACTERIZAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO PLUVIAL NO BRASIL

O Brasil apresenta em seu território principalmente os climas tropical e subtropical. Segundo caracterização de regime pluvial produzido com dados do *Climate Prediction Center* (CPC), cinco regiões climáticas englobam diferentes porções do Brasil, com porção no oeste do Mato Grosso do Sul contemplada por uma sexta região climática (FERREIRA; REBOITA, 2022; REBOITA *et al.*, 2010).

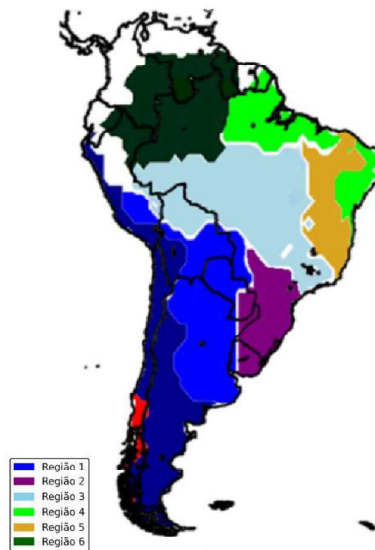


Figura 1. Regionalização pluvial do Brasil (FERREIRA; REBOITA, 2022)

A Região 1 abrange uma pequena porção do estado do Mato Grosso do Sul, além do Peru, Bolívia, Paraguai e Argentina. Trata-se de uma região com clima característico de monção, com duas temporadas bem definidas, com aumento de chuvas durante o verão e diminuição no inverno (FERREIRA; REBOITA, 2022; REBOITA *et al.*, 2010).

O Sul do Brasil está englobado na Região 2, está localizada entre os trópicos e as latitudes médias e apresenta diferenças contrastantes entre seus regimes climáticos, com precipitação bem distribuída ao longo do ano. Trata-se de uma região com formação de ciclones e sob grande influência de frentes frias, devido, principalmente, ao gradiente latitudinal de temperatura que gera instabilidade baroclínica, fazendo com que haja precipitação considerável durante o inverno (FERREIRA; REBOITA, 2022; REBOITA *et al.*, 2010).

A Região 3 se estende do sul da Amazônia até a Região Sudeste do país, abrangendo também a Região Norte e Centro-Oeste, além de um trecho da porção Norte da Bolívia. Esta região, semelhante à Região 2, apresenta níveis máximos de precipitação durante o verão e mínimos durante o inverno, caracterizada como área típica de monção sul-americana. O regime de chuvas da Região Sudeste do país é fortemente afetado pela Zona de Convergência do Atlântico Sul e por frentes frias, tendo estas importante papel na ocorrência de chuvas intensas, causando desastres naturais, principalmente nos estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro e Espírito Santo (FERREIRA; REBOITA, 2022; REBOITA *et al.*, 2010).

A Região 4 se desenvolve na porção mais ao norte da Região Norte do Brasil e no leste da Região Nordeste. Na Região 4 existe uma grande influência do aquecimento radiativo para a produção de atividade convectiva, proporcionando o desenvolvimento de Sistemas Convectivos de Mesoescala, responsáveis por intensa precipitação. Por se tratar de uma região costeira, brisas marítimas são frequentes na dinâmica da região, transportando umidade para o continente e ocasionando a geração de bandas lineares de nuvens paralelas à costa durante o fim da tarde e início da noite. Tais linhas de instabilidade ocorrem durante o ano todo, mas têm sua máxima frequência durante o outono, quando a Zona de Convergência Intertropical atinge sua posição mais ao sul, afetando diretamente as condições de instabilidade na Região Norte, com contribuição de 45% da precipitação durante a estação chuvosa no estado do Pará (FERREIRA; REBOITA, 2022; REBOITA *et al.*, 2010).

A Região 5 compreende o semiárido brasileiro, na Região Nordeste, caracterizado como uma região de baixa precipitação total, mas com um padrão cíclico anual semelhante ao da Região 3. Durante o verão e o outono, o posicionamento mais ao sul da Zona de Convergência Intertropical favorece a ocorrência de chuvas na região. enquanto durante o inverno, ocorre a sua inibição, por movimentos de subsidência, uma vez que a Zona de Convergência Intertropical fica deslocada para norte, além dos movimentos descendentes da atividade convectiva que ocorrem próximo à região amazônica. De forma geral, a variação interanual para os regimes de chuva da Região 5 se dá de forma excepcional, com a ocorrência de anos áridos e anos chuvosos. Esta variação está atribuída a mecanismos de teleconexão, como por exemplo a variação da temperatura da superfície do mar nos oceanos Pacífico e Atlântico tropicais. Assim, durante anos de *El Niño*, a subsidência da célula de Walker, agindo sobre a região, gera a inibição de atividade convectiva ao longo da porção

ocidental do Atlântico, reduzindo a precipitação no Nordeste brasileiro (FERREIRA; REBOITA, 2022; REBOITA *et al.*, 2010).

Por último, a Região 6 compreende a porção Noroeste brasileira, além de áreas do Peru, Colômbia e Venezuela. Trata-se de uma região de grande riqueza de biodiversidade e padrões biogeográficos, por compreender tanto a Amazônia quanto os Andes, como resultado da interação complexa entre os contrastes climáticos e topografia dos Andes. A Região 6 é uma região com altos níveis de precipitação total e algumas áreas são consideradas como *hotspots* de precipitação, com dados de 6.000 mm por ano, condições que são possíveis por padrões singulares de circulação e características da topografia, que resultam em uma enorme quantidade total de precipitação ao longo do ano. O oceano Atlântico e a Amazônia são, respectivamente, os mais importantes locais oceânico e continental de exportação de umidade para a circunvizinhança (FERREIRA; REBOITA, 2022; REBOITA *et al.*, 2010).

Em resumo, as regiões climáticas supracitadas evidenciam a complexidade e diversidade climática do Brasil, apresentando variações de precipitação, influência de sistemas atmosféricos e características geográficas que moldam os padrões climáticos locais. A interação entre fatores como Zona de Convergência Intertropical, frentes frias e a topografia dos Andes resulta em diferentes regimes de chuva e temperaturas, afetando diretamente fatores como a biodiversidade e as atividades humanas nas diversas regiões. Estudos detalhados desses padrões climáticos são essenciais para o planejamento ambiental, o monitoramento de desastres naturais e mapeamento de adaptações necessárias das comunidades frente às possíveis variações climáticas projetadas.

2.2. PRECIPITAÇÃO PLUVIAL NO BRASIL EM UM CLIMA EM MUDANÇAS

O termo “mudanças climáticas” refere-se, comumente, às mudanças no estado do clima, que podem ser estatisticamente definidas como persistentes por um período de tempo suficientemente extenso (normalmente na ordem de décadas), observadas por alterações nos padrões de média e/ou na variabilidade das propriedades (atmosfera, ciclo hidrológico, superfície terrestre, gelo e biosfera) (IPCC, 2018).

As mudanças climáticas podem ser tanto originadas por causas naturais, por mecanismos capazes de causar flutuações em parâmetros climáticos, como por

exemplo, variações na atividade solar, ciclos orbitais da Terra e atividades vulcânicas, quanto por causas antropogênicas, como emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), principalmente pela queima de combustíveis fósseis e mudanças no uso do solo. Desta forma, as flutuações ocorrem como resultado da exposição do sistema climático a diferentes forçantes naturais e antrópicas e a severidade e abrangência dessas flutuações estão associadas a efeitos de retroalimentação (BARRY; CHORLEY, 2013; CHRISTOPHERSON; BIRKELAND, 2017).

Os ciclos de manchas solares se dão aproximadamente em ciclos de 11 anos, com conseqüente flutuação de aproximadamente 1 Wm^{-2} na radiação emitida por este astro e variações de 22 anos, aproximadamente, para o campo magnético solar. Estima-se que esses componentes eram importantes fontes de variação climática, até aproximadamente o final do século XX, momento em que os efeitos humanos se tornaram superiores a estes (BARRY; CHORLEY, 2013; CHRISTOPHERSON; BIRKELAND, 2017). Já a órbita terrestre em torno do Sol tem como efeito principal sobre a flutuação climática a sazonalidade planetária, principalmente afetando a quantidade de radiação solar que chega até o planeta. Com relação às atividades vulcânicas, estas, quando em grande escala, estão associadas a grandes liberações de material particulado, afetando o clima pela interferência sobre a quantidade de radiação solar que chega até a superfície terrestre (BARRY; CHORLEY, 2013; CHRISTOPHERSON; BIRKELAND, 2017).

Os efeitos antropogênicos sobre o clima terrestre estão ligados a ações que tem como conseqüência a emissão de GEE e aerossóis, como por exemplo, o Dióxido de Carbono e o Dióxido de Enxofre pela queima de combustíveis fósseis, os quais têm conseqüências sob a absorção de radiação terrestre e aquecimento da atmosfera (MYHRE *et al.*, 2013).

O impacto das atividades antropogênicas sobre o ambiente passou a ser cada vez mais relevante, a partir do momento em que se desenvolveu a agricultura e a pecuária, um dos grandes marcos do desenvolvimento da humanidade, mas que tem como uma das principais conseqüências a remoção de florestas para o cultivo de espécies desejadas. As florestas têm importante função no balanço do gás carbônico atmosférico (*carbon budget*), não só através da fotossíntese, mas também porque esses ecossistemas servem como reservas de estocagem de carbono (BARRY; CHORLEY, 2013).

As mudanças no uso do solo talvez tenham sido a primeira atividade realizada pelo ser humano que possui um impacto significativo sobre o ambiente. Isso porque esta prática afeta não só o balanço de carbono (*carbon budget*), pela desestruturação dos processos fotossintéticos que ocorreriam no local e pela consequente liberação das reservas de carbono que ali estavam estocadas, mas também pelo fato de que a mudança no uso do solo, principalmente quando se fala em desmatamento, afeta o albedo da superfície, aumentando assim o seu desequilíbrio radiativo. A cobertura vegetal, dentre suas muitas funções ecológicas, exerce a absorção da radiação solar, combustível necessário para a realização do processo de fotossíntese, e sua retirada faz com que ocorra um desequilíbrio radiativo na região, com maior reflexão da radiação solar (CHRISTOPHERSON; BIRKELAND, 2017; IPCC, 2022)

Os avanços alcançados propiciaram um desenvolvimento e crescimento exponencial da humanidade, permitindo um salto de uma população de aproximadamente 1,6 bilhão de pessoas por volta de 1900 a uma população de 8 bilhões de pessoas, alcançada no ano de 2022 (CHRISTOPHERSON; BIRKELAND, 2017). Junto com o aumento populacional, criou-se cada vez mais a necessidade de ocupar espaços previamente naturais para suprir as diferentes demandas que acompanharam tal crescimento. Com isso, intensificou-se também os impactos antrópicos sobre o meio por atividades como a já citada mudança no uso do solo, pela prática de queimadas, pelo aumento da taxa de emissão de GEE da queima de combustíveis fósseis, sendo que este último é a principal contribuição humana atualmente para as mudanças climáticas (CHRISTOPHERSON; BIRKELAND, 2017).

O entendimento da forma como essas atividades afetam as diferentes forçantes climáticas, afetando, conseqüentemente, o clima global, elucidou as causas antrópicas e o seu efeito sobre as mudanças climáticas. De acordo com o Sexto Relatório de Avaliação (*Sixth Assessment Report – AR6*) do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC*), os efeitos das mudanças climáticas globais já podem ser observados em diferentes escalas pelo planeta, como mudança no balanço de radiação, aumento da temperatura média global, alterações na sazonalidade e magnitude das chuvas, derretimento generalizado da criosfera, aumento do nível médio dos oceanos, aumento na frequência e intensidade de eventos extremos, dentre outros (IPCC, 2022).

Em seu relatório "*Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability*" o IPCC avalia os impactos sofridos pelos diferentes ecossistemas, pelas comunidades humanas e pela biodiversidade relacionados aos efeitos das mudanças climáticas. Com base neste documento, podemos inferir que os efeitos de tais alterações já podem ser sentidos em todas as regiões do globo e que a tendência é de que estes impactos serão cada vez mais frequentes e severos, o que deixa explícito a necessidade de que sejam tomadas atitudes de adaptação para reduzir os danos destes eventos e construção de um futuro resiliente ao clima (IPCC, 2022).

Ainda neste documento, a organização apresenta um panorama abrangente que relaciona os efeitos sobre as mudanças climáticas que tem origem nas atividades antrópicas, iniciando principalmente a partir de meados do século XX, apontando como principal atividade impactante atual a queima de combustíveis fósseis e consequente liberação de GEE. Atividades como o transporte, a geração de energia por termelétricas e diferentes setores da indústria têm como parte do processo a queima de carvão, petróleo e gás natural, que têm como consequência grande liberação de CO₂ na atmosfera, importante gás do efeito estufa com capacidade de absorção e retenção do calor solar, influenciando o clima em escala global (IPCC, 2021; IPCC, 2022).

O desmatamento é outra atividade antrópica fortemente ligada às alterações do clima, seja pela pecuária, seja pela mudança no uso do solo para plantação de monoculturas, incluindo a relação com o uso de fertilizantes nitrogenados. Uma vez que as florestas atuam na estocagem de carbono na sua biomassa, o seu corte está associado ao retorno deste dióxido de carbono (CO₂) anteriormente armazenado para a atmosfera. A conversão de ecossistemas em regiões de pastagem, por exemplo, está associada a alterações também no albedo da região, afetando o seu balanço radiativo, além de a atividade pecuária estar associada a ruminantes como vacas, ovelhas e cabras, animais que liberam metano (CH₄) no seu processo de digestão, um potente gás do efeito estufa (IPCC, 2021; IPCC, 2022).

Dentre as consequências decorrentes das mudanças climáticas aceleradas pelas atividades humanas, que já podem ser notadas em diferentes localidades do globo, temos as alterações nos padrões dos eventos extremos. A frequência com que estes eventos vêm ocorrendo está cada vez maior e a intensidade com que ocorrem também vem crescendo, associado a isso, projeções apontam para uma intensificação cada vez maior deste panorama (IPCC, 2021; IPCC, 2022).

Estudos como o realizado por Dalagnol *et al.* (2021) são uma importante ferramenta no entendimento da influência que as mudanças climáticas efetuam sobre tais eventos. O estudo foi realizado com relação ao evento de precipitação intensa que acometeu parte do estado de Minas Gerais em janeiro de 2020. Por meio da associação entre a análise de dados observacionais e de modelagem climática, os autores concluíram que as mudanças climáticas com forçantes antrópicas aumentaram em pelo menos 70% a probabilidade de ocorrência deste evento. Além desta inferência, o estudo também constatou que a quantidade de chuva precipitada durante o período foi significativamente maior que a média histórica desta região. Dentre os impactos causados por este evento, podemos citar 56 mortes humanas, mais de 90.000 pessoas desabrigadas e um prejuízo financeiro de R\$ 1,3 bilhão (DALAGNOL *et al.*, 2021).

Dentre as maiores preocupações contemporâneas está o entendimento dos efeitos das mudanças climáticas sobre o bem-estar humano em diferentes esferas. A partir do emprego da Abordagem das Capacitações de Amartya Sen como estrutura analítica, permitiu-se avaliar os impactos multidimensionais das alterações do clima nas capacidades e desenvolvimentos das populações, demonstrando que estas alterações são uma séria ameaça ao desenvolvimento humano, influenciando atores sociais como: educação, saúde, segurança alimentar e meios de subsistência. Dentre os efeitos das mudanças do clima estão o possível aumento da incidência de determinadas doenças, redução de produtividade agrícola e perdas de meios de vida, principalmente para comunidades dependentes da agricultura, pesca e turismo, além de interrupções de atividades econômicas e escolares em decorrência de eventos climáticos extremos (CORREA-MACANA; COMIM, 2013).

Com isso, o uso de modelos climáticos se tornou uma importante ferramenta para tentar prever como o clima pode se desenvolver diante de diferentes cenários de intervenção humana, para que sejam tomadas medidas que revertam ou mitiguem os seus efeitos. Uma das principais forçantes usadas para a projeção do clima é a concentração de GEE, cujas concentrações têm importante impacto sobre como o clima se desenvolverá pelos próximos anos (MCTI, 2016)

Um exemplo de aplicação é o *Representative Concentration Pathways (RCP)*, ou Trajetórias de Concentração Representativas, utilizado no AR5, que apresenta diferentes cenários climáticos futuros de acordo com os padrões de concentração de GEE até o ano de 2100. Tais cenários foram propostos pelo *Intergovernmental Panel*

on *Climate Change* (IPCC) e têm relação direta com os padrões de desenvolvimento econômico e tecnológico e os níveis de emissões desses gases associados a tais desenvolvimentos, afetando assim a forçante radiativa até o final do século. São apresentados 4 cenários, os RCPs 2.6, 4.5, 6.0 e 8.5, cujos valores representam especificamente a forçante radiativa expressada em watts por metro quadrado ($W m^{-2}$) até o ano de 2100 (IPCC, 2022).

No último relatório do IPCC, o AR6, são apresentados novos cenários seguindo um caminho semelhante, o *Shared Socio-economic Pathways* (SSP) que, em contraste com os RCPs, levam em consideração também diferentes caminhos de desenvolvimento econômico e consideram, por exemplo, fatores como condições de desigualdade social. Vale ressaltar que, apesar do uso das projeções climáticas ser uma forte ferramenta na tentativa de predição do comportamento climático futuro, esta metodologia apresenta fontes de incerteza, principalmente no fato de que se baseiam em modelos matemáticos e que estes não são representações perfeitas do mundo real (MCTI, 2016).

A América do Sul é uma das regiões do planeta que necessita de atenção especial com relação aos impactos das mudanças climáticas. Isso porque se trata de um continente que apresenta alto grau de exposição e vulnerabilidade, cujos impactos podem ser amplificados por questões como pobreza e desigualdade social, além de possuir regiões com elevada densidade e crescimento populacional. Outro fato destacado é que boa parte das *commodities* geradas no continente é dependente de recursos naturais locais ou nacionais, dependência diretamente afetada pelas mudanças no uso do solo, principalmente com relação a atividades de desmatamento, cujas principais consequências são a perda de diversidade e degradação do solo (IPCC, 2022)

É neste continente que se encontra a floresta Amazônica, um importante *hotspot* para a conservação, lar de uma das maiores biodiversidades do planeta e que atua como um importante reservatório global de carbono, com importante influência sobre o clima do Brasil. Esta floresta apresenta alta vulnerabilidade a secas extremas e temperaturas acima do normal, anormalidades que já estão sendo observadas na região e que, muito provavelmente, já estão causando impactos sobre os ecossistemas (IPCC, 2022).

Estas e outras mudanças no clima, quando aplicadas a países como o Brasil, cuja dependência sobre a produção e comercialização de *commodities* a partir de

bens plantados é grande, tem um forte impacto econômico (IPCC, 2022). Segundo o IBGE, estão entre os mais importantes produtos agrícolas brasileiros a soja, o milho em grão, a cana-de-açúcar, o café e o algodão herbáceo, com respectivos valores de produção anual em 2022 de, aproximadamente, 345, 93, 52 e 33 bilhões de reais. A cana-de-açúcar é o produto agrícola com maior produção e a soja o com maior valor de produção para o ano de 2022 (IBGE, 2022).

O fator antrópico, desde o período pré-industrial, tem tido cada vez mais influência significativa sobre as alterações climáticas percebidas na atualidade e estas mudanças afetam a ocorrência de eventos extremos climáticos, tanto quando falamos na frequência com que têm ocorrido, quanto na intensidade de ocorrência, principalmente induzidos pela emissão de GEE (CHRISTOPHERSON; BIRKELAND, 2017; IPCC, 2021; IPCC, 2022). Até mesmo pequenos aumentos na temperatura média global têm potencial de causar mudanças estatisticamente significativas na ocorrência de eventos extremos, principalmente em escala global que, por sua vez, tem efeitos na intensidade e frequência de extremos climáticos em escala regional (IPCC, 2022).

Dentre os eventos extremos, temos o caso de temperaturas extremas, as chuvas intensas, incluindo aquelas associadas a ciclones tropicais, os eventos de precipitação devastadoras e em contrapartida as secas extremas em algumas regiões. Esses eventos tendem a se intensificar cada vez mais, mesmo que a meta proposta pelo Acordo de Paris, que limita o aquecimento médio global a 1,5°C acima dos níveis pré-industriais, fosse seguida. (IPCC, 2022).

Como por exemplo a seca histórica experienciada pelo Sudeste brasileiro no ano de 2014, que teve como consequência diferentes impactos socioeconômicos e ambientais, como por exemplo a redução na disponibilidade de água para a população, efeitos negativos sobre a produção energética de fonte hídrica, efeitos sobre a agricultura etc. (COELHO *et al.*, 2016). Segundo Coelho *et al.* (2016), existe relação direta entre os eventos de escassez de pluviosidade da região Sudeste do Brasil e aumento da temperatura superficial do Oceano Atlântico, indicando que aumentos de temperatura neste oceano são consistentes com uma redução da precipitação observada no ano de 2014 (COELHO *et al.*, 2016)

Tamanho desastre trouxe não apenas impactos sociais, mas também teve como consequência um estrondoso impacto econômico para o país, com perdas de mais de US\$ 5 bilhões, sendo que, segundo a WMO (*World Meteorological*

Organization), 40% das perdas econômicas apontadas para a América do Sul são referentes ao Brasil nos últimos 50 anos, totalizando aproximadamente US\$ 41,7 bilhões durante este período (WMO, 2021).

Outro evento extremo da história do país foi o ocorrido no município de Petrópolis, uma localidade rica em morros e declividades, a 68 km da capital do Rio de Janeiro, no ano de 2022. Um caso de pluviosidade em grande escala, com 258 mm de chuva durante um período de 3 horas, gerado por um forte sistema convectivo de mesoescala, resultando em inundações e deslizamentos. O desastre foi classificado como o pior evento de chuvas desde o ano de 1932 e teve como consequência 231 mortes, além da destruição de diversas residências da região. (ALCÂNTARA *et al.*, 2023).

O evento mais recente a ser citado de precipitação extrema, ocorrido no estado do Rio Grande do Sul entre abril e maio de 2024. Anualmente, o estado tem sido impactado por eventos climáticos extremos, sendo o de maior intensidade até então o registrado em maio de 1941, que resultou em um aumento do nível do rio Guaíba de 4,76 metros. O evento de 2024 superou este precedente, com uma elevação recorde do nível do Guaíba de 5,35 metros. Este evento provocou inundações que afetaram não apenas as áreas diretamente impactadas pelas precipitações intensas, mas também municípios localizados a mais de 400 quilômetros dessas regiões (ROCHA *et al.*, 2024).

Alterações climáticas em todas as regiões do país já podem ser observadas, atualmente, principalmente no que diz respeito à precipitação e à temperatura do ar. É o que demonstra estudo realizado por Regoto *et al.* (2021), que analisou as tendências sazonais e anuais de índices extremos relacionados à precipitação no Brasil ao longo do período compreendido entre 1961 e 2018. Foram utilizados os dados de precipitação disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) para a produção da análise, sendo avaliados os dados disponíveis para 252 estações meteorológicas do INMET, com dados para o período de 1961 a 2017, e 216 da ANA, com dados para o período entre 1961 e 2018 (REGOTO *et al.*, 2021).

Regionalmente, há redução de chuvas extremas estatisticamente significativa no Nordeste, indicando um clima mais seco, principalmente durante as estações do verão e do outono (REGOTO *et al.*, 2021). Em contrapartida, a Região Sul e o sul da Região Centro-Oeste apresentam tendência significativa de aumento nas

precipitações extremas, especialmente na primavera e verão, respectivamente (REGOTO *et al.*, 2021).

As projeções para o Brasil mostram um aumento da temperatura média e ocorrência de extremos quentes para todas as regiões do país, enquanto as projeções para a precipitação apontam para uma diminuição nas Regiões Norte e Nordeste e aumento nas Regiões Sul, Sudeste e uma faixa da Região Centro-Oeste (IPCC, 2022). Também se projeta, para os próximos anos, um aumento do nível do mar para toda a costa do país, que devem ter como consequência um aumento na ocorrência de eventos como inundações e enchentes para diversos estados brasileiros, associadas também a uma maior ocorrência de eventos extremos de precipitação. Todos estes dados podem e devem ser aplicados na tomada de decisões e planejamento urbano, uma vez que, dentre os riscos apresentados por essas alterações, está o risco à vida humana, além de danos econômicos e ambientais (IPCC, 2022).

É importante ressaltar que os riscos associados às projeções climáticas citadas têm diferentes impactos nos diferentes níveis de classe social, fato que deve ser considerado em um país com grandes níveis de desigualdade como o Brasil. Isso deve ser levado em consideração quando falamos, por exemplo, em regiões onde uma grande quantidade de pessoas estão vivendo em condições sanitárias e de moradia inadequadas. Por exemplo, cidades superpopulosas como São Paulo e Rio de Janeiro, onde um grande número de pessoas vivem em locais onde o aumento de pluviosidade traz consigo o aumento do risco de eventos de deslizamentos, possivelmente afetando estas comunidades (IPCC, 2022).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. DADOS

A precipitação pluvial diária foi obtida do *CPC Global Unified Gauge-Based Analysis of Daily Precipitation*, National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA/OAR/ESRL PSL), com espaçamento horizontal global de 0,5° de latitude x 0,5° de longitude (<<https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.cpc.globalprecip.html>>). O CPC/NOAA tem como objetivo principal criar um conjunto de dados unificados de precipitação com quantidade consistente e qualidade aprimorada, pela combinação de diferentes fontes de informação.

Os dados de precipitação diária do CPC são calculados a partir da combinação entre os dados observados por estações meteorológicas, modelos numéricos de previsão do tempo e técnicas de interpolação espacial. Por conta da distribuição irregular de estações meteorológicas, a interpolação espacial é utilizada para estimar a precipitação em pontos onde não há estações. Além disso, as observações são complementadas com informações de satélites e radares meteorológicos para áreas onde há esta escassez. Para reduzir a influência de dados outliers, em que eventos de precipitação muito intensas podem ser causadas por erros de medição, o CPC utiliza métodos estatísticos que atenuam valores muito altos e ajustam as medições para suavizar a distribuição e representatividade de condições climáticas médias, gerando assim uma suavização de extremos (CARDOSO; QUADRO, 2017; TORRES *et al.*, 2020).

Diante das limitações apontadas, referentes aos dados do CPC, a escolha dos índices de extremos escolhidos (PRCPTOT, CDD, CWD, R1mm, R20mm e SDII) foi feita de forma a complementar essas lacunas, permitindo uma avaliação mais detalhada da ocorrência destes eventos. Tais índices oferecem uma ferramenta para capturar variações locais e regionais de eventos extremos, essenciais na avaliação dos impactos climáticos e fornecer subsídios para o planejamento adaptativo e para o desenvolvimento de políticas climáticas mais assertivas.

Os índices de extremos de precipitação pluvial anual para o Brasil, para diferentes experimentos, foram obtidos do *Copernicus Climate Change Service* (2022) para o modelo climático EC-Earth3-Veg-LR. Estes índices de extremos foram propostos por *the Joint World Meteorological Organization* (WMO) *Commission for Climatology* (CCI)/*World Climate Research Program* (WCRP)/ *Joint Technical*

Commission for Oceanography and Marine Meteorology (JCOMM) Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI). Os índices avaliados foram: precipitação anual (PRCPTOT), número máximo de dias consecutivos com precipitação inferior a 1 mm (CDD), número máximo de dias consecutivos com precipitação igual ou superior a 1 mm (CWD), número de dias no ano com precipitação superior ou igual a 1 mm (R1mm) e a 20 mm (R20mm) e índice de intensidade de precipitação simples (SDII).

O modelo climático EC-Earth3-Veg-LR possui resolução espacial de 1,1° de latitude x 1,1° de longitude (<https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6/>). Este modelo compreende o CMIP6 (EYRING *et al.*, 2016) e serviu de base para o *Sixth Assessment Report (AR6)* do IPCC. O modelo EC-Earth3-Veg-LR foi escolhido por apresentar um dos menores vieses de precipitação pluvial no Brasil dentre os modelos do CMIP6 (FIRPO *et al.*, 2022). Este modelo foi desenvolvido de forma colaborativa através do consórcio de investigação europeia EC-Earth para fornecer uma ferramenta integrada de última geração para estudos do sistema terrestre (DÖSCHER *et al.*, 2022). As configurações do modelo EC-Earth3-Veg-LR incluem as componentes atmosférica, oceânica e de vegetação dinâmica.

Os modelos climáticos são uma tentativa de representar numericamente o sistema climático, utilizando como base as propriedades relacionadas a seus parâmetros biológicos, químicos e físicos que afetam, como por exemplo, a atmosfera, superfície terrestre, oceano, cobertura vegetal e cobertura de neve e gelo. Tais modelos podem ser separados em duas categorias, globais e regionais, cuja principal diferença é a escala de avaliação. Uma vez que os modelos regionais permitem a resolução de processos em menores escalas, esta categoria também permite que se modele processos com maior detalhe e realismo, quando comparados aos modelos globais.

O CMIP6, utilizado pelo IPCC na análise de mudanças climáticas, é um projeto que se iniciou no ano de 1995, sob responsabilidade do *World Climate Research Programme (WCRP)* e *The Working Group on Coupled Modelling (WGCM)* e consiste em uma plataforma de agregação de um conjunto de modelos climáticos com a disponibilização de uma infraestrutura para coleta, organização e distribuição de dados de saída de modelos, a partir da utilização de diferentes conjuntos de experimentos.

Os *Shared Socio-Economic Pathways* (Caminhos Socioeconômicos Compartilhados – SSPs) consideram diferentes cenários de emissões de CO₂ advindos de atividades humanas, afetando a forçante radiativa planetária. O avanço dos SSPs está na inclusão de fatores de desenvolvimento socioeconômico influenciando os padrões de emissão de CO₂ associados ao aquecimento global, levando assim aos diferentes cenários de forçamento radiativo e de concentrações de CO₂ até o final do século (LI *et al.*, 2021).

Foram utilizados os índices de extremos de precipitação para os seguintes experimentos: histórico, SSP1-2.6 e SSP5-8.5. O SSP1-2.6 trata-se de um cenário mais otimista de redução de emissões de CO₂. É o cenário apontado como o necessário para limitar o aquecimento médio global a níveis abaixo de 1,5°C acima dos níveis pré-industriais até o fim do século (CHEN *et al.*, 2021). Já o SSP5-8.5 é o mais pessimista dentre os cenários propostos pelo IPCC, com aumento substancial de emissão de CO₂ até o final do século, com possível consequência de um aumento maior do que 4°C na temperatura média global acima dos níveis pré-industriais (CHEN *et al.*, 2021). Diferentes fatores de desenvolvimento socioeconômico estão relacionados a estes cenários, como crescimento populacional e desigualdade social, desenvolvimento de políticas com viés climático, desenvolvimento de tecnologias de baixo carbono e mitigação de emissões. Apenas um membro do conjunto do modelo será considerado nas análises.

3.2. MÉTODOS

A partir dos dados de precipitação pluvial do CPC foram calculados os mesmos índices de extremos de precipitação pluvial anual para o Brasil, obtidos para o experimento histórico e em cenários futuros de mudanças climáticas do CMIP6/IPCC: precipitação anual (PRCPTOT), número máximo de dias consecutivos com precipitação inferior a 1 mm (CDD), número máximo de dias consecutivos com precipitação igual ou superior a 1 mm (CWD), número de dias no ano com precipitação superior ou igual a 1 mm (R1mm) e a 20 mm (R20mm) e índice de intensidade de precipitação simples (SDII). O cálculo desses índices foi feito através do *software Climate Data Operators* (CDO). Os índices de extremos de precipitação observados

(CPC) foram avaliados por décadas (1980-1989, 1990-1999, 2000-2009 e 2010-2019) em relação a todo o período (1980-2019) através de campos espaciais de anomalias.

Posteriormente foram avaliadas as possíveis tendências anuais na frequência e intensidade dos índices de extremos de precipitação. Para avaliação de tendência foi aplicado o método Contextual de Mann-Kendall (CMK), que consiste na avaliação específica para determinação de tendência estatisticamente significativa na alteração temporal de uma série de dados a ser analisada. Trata-se de um método não-paramétrico sequencial, que se apresenta como uma potente ferramenta para tal propósito (MANN, 1945; KENDALL, 1975). Associado a isso, também foi realizada a análise da magnitude da tendência, utilizando a curvatura de Sen, um método também não-paramétrico e que apresenta insensibilidade a outliers e dados ausentes, sendo, por isso, mais rigoroso que outros métodos, como a curvatura de regressão linear, por exemplo (SEN, 1968).

Os índices de extremos de precipitação simulados (modelo EC-Earth3-Veg-LR do CMIP6/ IPCC) foram interpolados para o mesmo espaçamento horizontal dos dados do CPC ($0,5^\circ \times 0,5^\circ$) para a posterior comparação entre os conjuntos de dados através do cálculo de viés, entre 1981-2010:

$$\text{Viés} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i) \quad (1)$$

onde n é o número de tempos, P_i é o valor previsto (índice de extremo simulado) para o tempo i e O_i é o valor observado (índice de extremo observado).

Para avaliar as mudanças na frequência e intensidade dos índices de extremos de precipitação em cenários futuros de mudanças climáticas (SSP1-2.6 e SSP5-8.5), para os períodos de 2041-2070 e 2071-2100, estes índices foram comparados com o experimento histórico (1981-2010) através da diferença entre ambos.

4. RESULTADOS

4.1. ÍNDICES DE EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO: CLIMATOLOGIA, VARIABILIDADE E TENDÊNCIA

Nas Figuras a seguir são apresentados os resultados da aplicação dos índices de extremos de precipitação aplicados aos dados observados (CPC) para todo o período (1980-2019), apresentando assim a climatologia destes índices. Além disso, são apresentados os resultados obtidos para a análise de anomalia para cada década, de forma a possibilitar avaliar o comportamento da variação da década em relação ao período todo. Assim, anomalias positivas são descritas como comportamento de variação em que o índice apresentou valores superiores para determinada década em comparação com o período todo e, para anomalias negativas, o índice apresentou valores inferiores para determinada década em comparação ao período todo.

O índice PRCPTOT (Figura 2) variou positivamente na Região Norte entre os anos de 1980 e 1989, mantido em parte da região na década de 1990 a 1999, enquanto em parte é observado uma variação negativa. Para o período entre 2000 e 2009, vemos um incremento de áreas com variação negativa, sendo que para o período de 2010 a 2019 a região apresentou variação negativa para o índice em relação ao período todo. Com isso, podemos inferir que ao longo das quatro décadas analisadas houve uma redução da precipitação total anual para a região. Na Região Nordeste do Brasil, a década de 1980 a 1989 apresenta uma predominância de anomalias positivas para o PRCPTOT, seguida pela década de 1990 a 1999 próxima do equilíbrio entre anomalias positivas e negativas, voltando a seguir uma predominância de anomalias positivas entre 2000 e 2009 e finalizando com predominância de anomalias negativas para o período entre 2010 e 2019.

A PRCPTOT para a Região Centro-Oeste apresenta predominância de anomalias positivas para a primeira (1980-1989) e a segunda década de análise (1990-1999), passando para uma sutil predominância de anomalias negativas na terceira década e finalizando com predominância total de anomalias negativas, indicando para uma redução na quantidade total de precipitação anual ao longo dos 40 anos estudados. Na Região Sudeste, a PRCPTOT inicia a primeira década (1980-1989) com predominância quase total de anomalias positivas, com leve redução na década seguinte (1990-1999), seguida por uma década (2000-2009) de sutil prevalência de anomalias positivas; na última década (2010-2019) há predominância

quase total de anomalias negativas. Para a Região Sul, entre 1980-1989 e 1990-1999 a PRCPTOT apresenta uma prevalência de anomalias positivas, seguido por um período de predominância de anomalias negativas entre 2000-2009, que se intensifica para a década de 2010-2019.

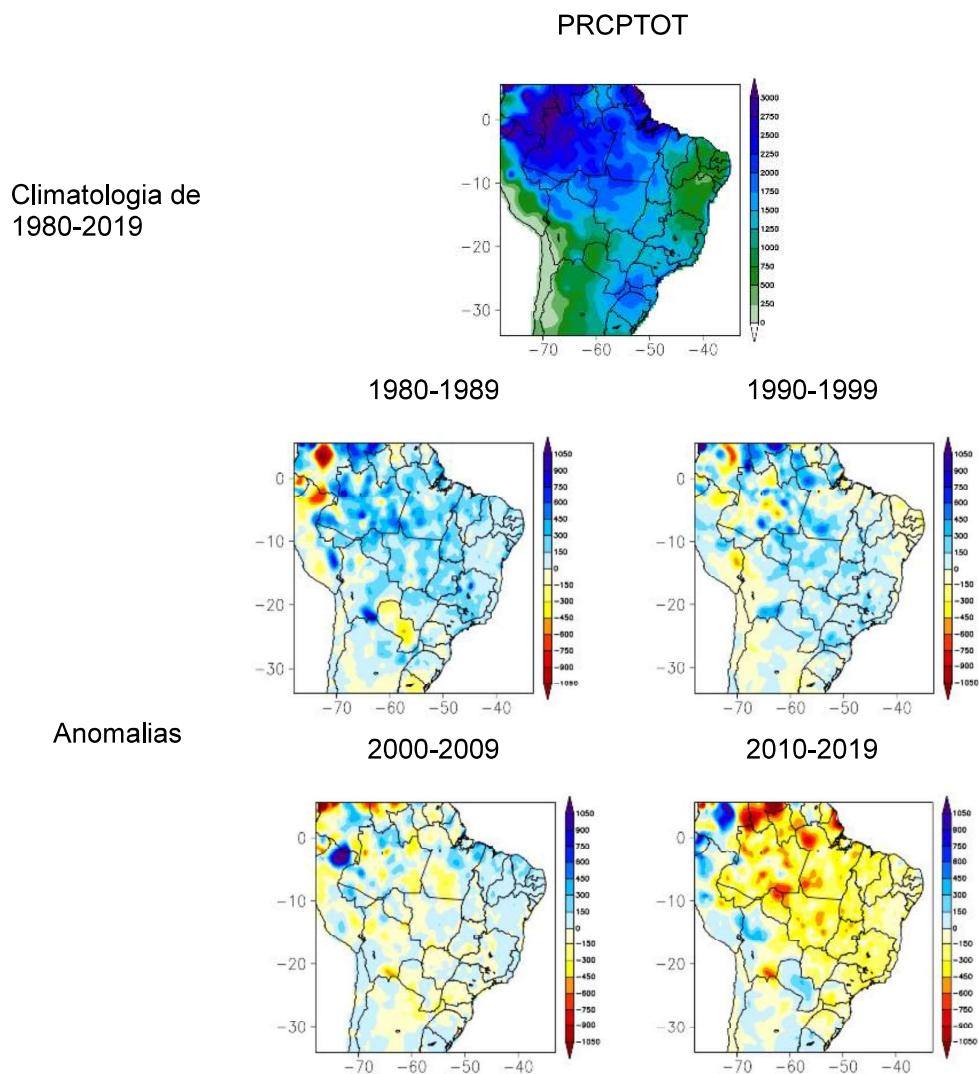


Figura 2. Climatologia (1980-2019) e anomalia decadal (1980-89, 1990-99, 2000-09 e 2010-19) em relação à climatologia do índice de extremo de precipitação observados para o Brasil: precipitação anual (PRCPTOT).

Em relação ao índice CDD (Figura 3), na Região Norte do país este índice apresenta uma predominância de anomalias negativas para a década de 1980-1989, seguido por uma década de equilíbrio entre anomalias positivas e negativas, voltando à prevalência de anomalias negativas na década de 2000-2009 e expressiva predominância de anomalias positivas na década de 2010-2019. Na Região Nordeste verificam-se tanto pontos de anomalia positiva quanto negativa para a década de

1980-1989, mas com predominância de anomalias negativas, seguido pela década de 1990-1999 com anomalias positivas na maior parte da região, revertida para uma predominância de anomalias negativas expressivas para a década de 2000-2009 e retornando, por fim, para um estado de predominância de anomalias positivas na década de 2010-2019.

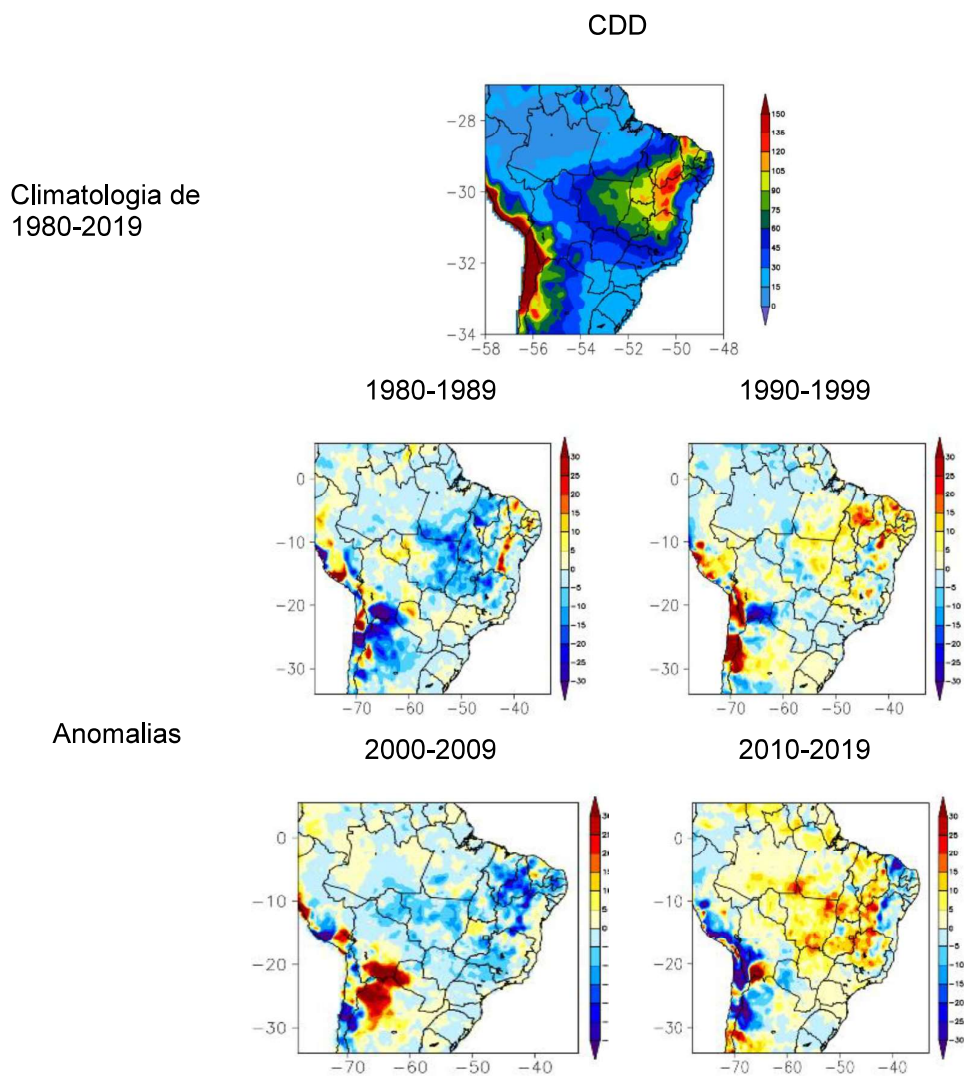


Figura 3. Climatologia (1980-2019) e anomalia decadal (1980-89, 1990-99, 2000-09 e 2010-19) em relação à climatologia do índice de extremo de precipitação observados para o Brasil: número máximo de dias consecutivos com precipitação inferior a 1 mm (CDD).

O CDD para a Região Centro-Oeste inicia o período de 1980 a 1989 com prevalência de anomalias negativas, com pontos de anomalia negativa expressiva, seguido por uma prevalência de anomalias positivas não muito intensas entre 1990 e 1999, voltando à prevalência de anomalias negativas entre 2000 e 2009 e chegando à década de 2010 a 2019 com prevalência de anomalias positivas, havendo pontos

onde estas anomalias são mais expressivas. Na Região Sudeste, o CDD apresenta predominância de anomalias negativas para o período entre 1980-1989, substituída pela predominância de anomalias positivas no período entre 1990-1999, retornando ao domínio de anomalias negativas entre 2000-2009 e finalizando a década de 2010-2019 com predominância expressiva de anomalias positivas. Na Região Sul, O CDD apresenta uma sutil predominância de anomalias negativas no período entre 1980-1989, com sutil predominância de anomalias positivas no período de 1990-1999, revertido a um estado de prevalência de anomalias negativas entre 2000-2009 e finalizando a década de 2010-2019 com predominância de anomalias positivas.

Na Região Norte, o CWD (Figura 4) inicia a primeira década (1980 a 1989) com predominância de anomalias positivas bem expressiva, com leve redução, mas mantendo a predominância dessas anomalias na década seguinte (1990 a 1999), revertida para a predominância de anomalias negativas na década seguinte (2000 a 2009) e passando para um estado quase de prevalência total de anomalias negativas na última década analisada (2010 a 2019), apontando que houve uma redução dos registros de dias consecutivos de chuva nesta região ao longo dos 40 anos analisados.

A Região Nordeste, por outro lado, apresenta dominância de anomalias positivas no período de 1980-1989, expressivas em alguns pontos da região, passando para 1990-1999 com predominância de anomalias negativas, que se intensifica nas duas décadas seguintes, 2000-2009 e 2010-2019, sendo bem expressiva no período entre 2000-2009. Tais resultados indicam uma redução na ocorrência de dias consecutivos de chuva para a região ao longo do período das quatro décadas. O CWD na Região Centro-Oeste inicia o período entre 1980 e 1989 com predominância de anomalias positivas para a região, com leve redução de prevalência entre 1990 e 1999, seguido por predominância de anomalias negativas entre 2000 e 2009, fechando o período de análise com o período entre 2010 e 2019 onde há predominância quase que total de anomalias negativas. Apontando para uma redução com número consecutivo de dias chuvosos.

Na Região Sudeste, o CWD inicia a primeira década (1980-1989) com predominância quase total de anomalias positivas, com leve redução de tal predominância na década seguinte (1990-1999), passando para uma década em que prevaleceu a ocorrência de anomalias negativas (2000-2009) e com a última década (2010-2019) de análise apresentando predominância total e expressiva de anomalias negativas. Tais resultados apontam para um clima mais seco ao longo dos 40 anos

analisados. O CWD na Região Sul, para a primeira década de análise (1980-1989), apresentou predominância expressiva de anomalias positivas, seguido por uma predominância total na década que a sucede (1990-1999), passando a um cenário de predominância expressiva de anomalias negativas para as duas últimas década avaliadas (2000-2009 e 2010-2019).

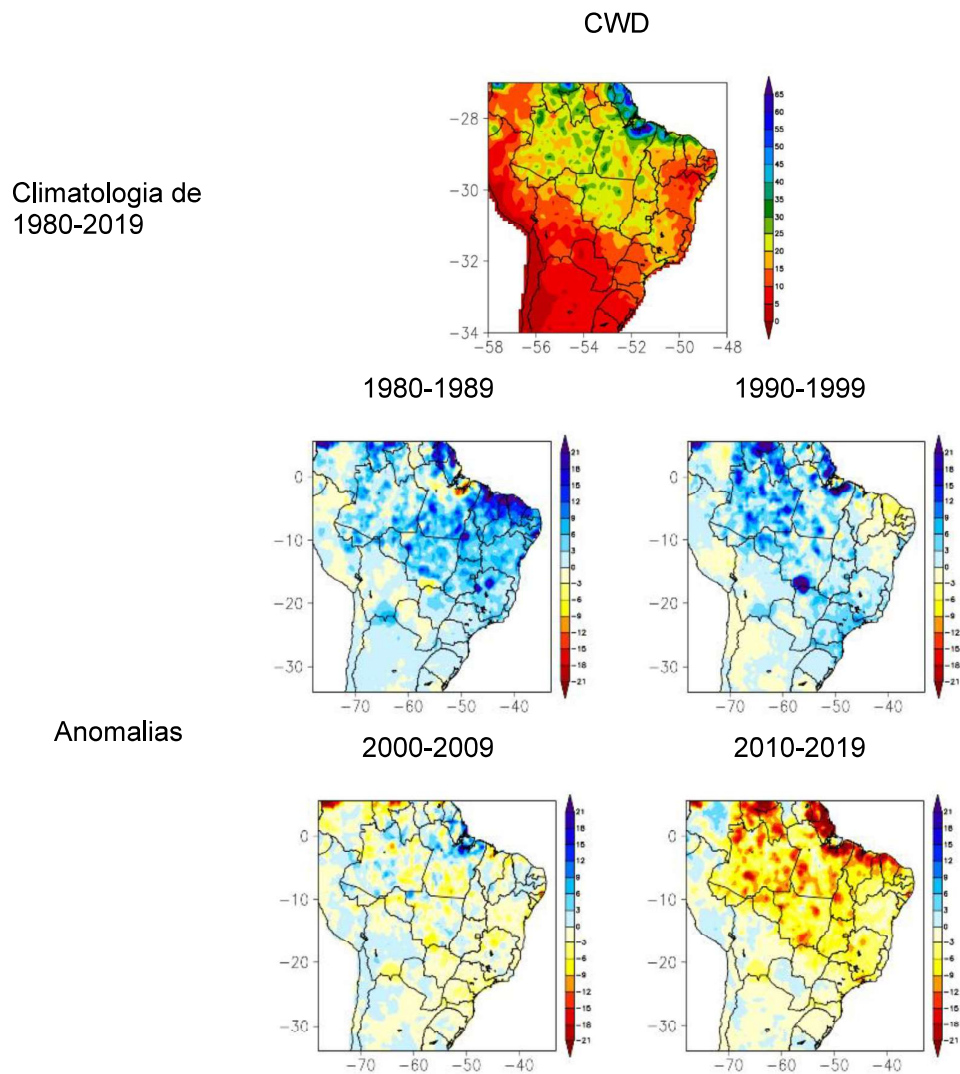


Figura 4. Climatologia (1980-2019) e anomalia decadal (1980-89, 1990-99, 2000-09 e 2010-19) em relação à climatologia do índice de extremo de precipitação observados para o Brasil: número máximo de dias consecutivos com precipitação igual ou superior a 1 mm (CWD).

Para o R1mm (Figura 5) podemos observar que entre 1980 e 1999 (duas primeiras décadas) há uma variação positiva na Região Norte, que não se mantém para a década de 2000-2009, que apresenta dominância para a variação negativa deste índice, com redução significativa em diferentes partes da região para o período de 2010 a 2019. Com isso, fica evidente uma redução de dias com precipitação ao

longo das décadas na região. A Região Nordeste inicia a primeira década com predominância total de anomalias positivas de R1mm, passando para a década de 1990-1999 com predominância não tão expressiva de anomalias positivas, seguido pela década de 2000-2009 onde há predominância de anomalias negativas, que se intensifica e passa a ser quase total na década de 2010-2019, apontando para uma redução da ocorrência de dias com precipitação para região ao longo do período todo.

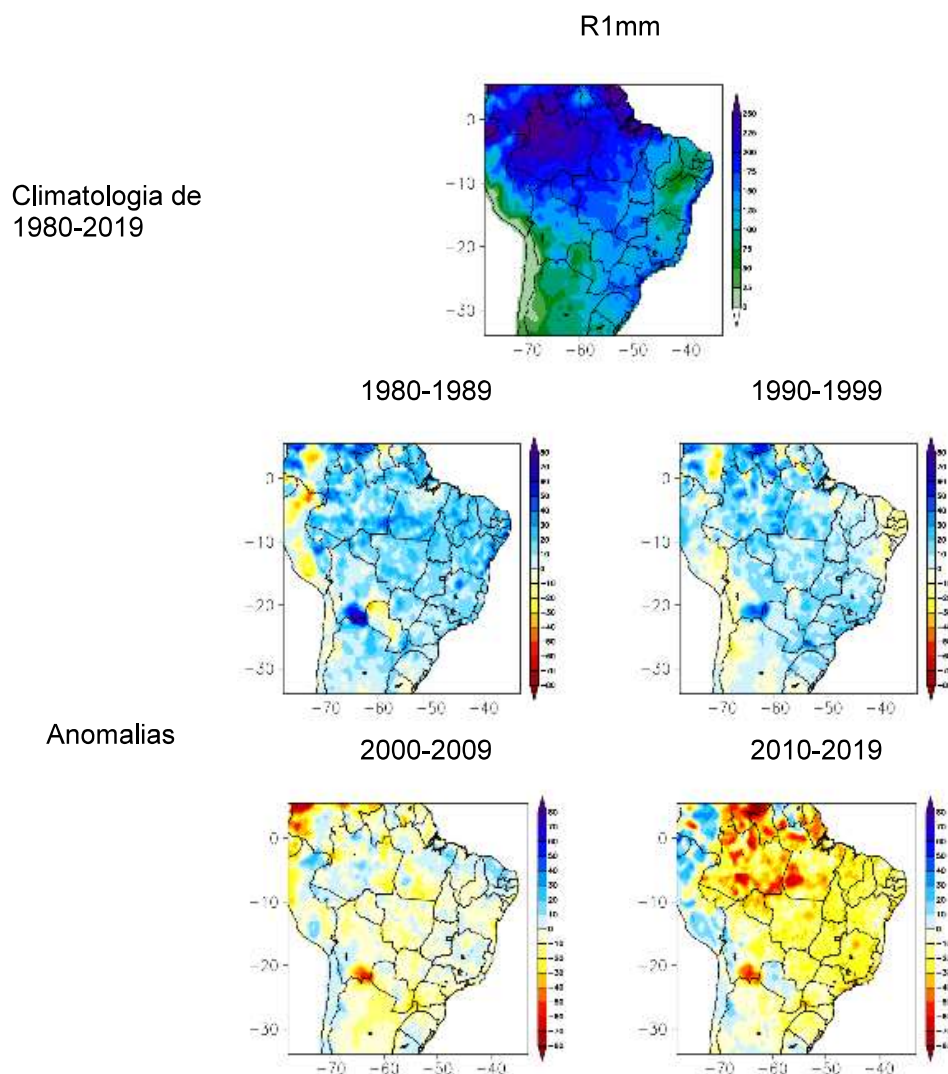


Figura 5. Climatologia (1980-2019) e anomalia decadal (1980-89, 1990-99, 2000-09 e 2010-19) em relação à climatologia do índice de extremo de precipitação observados para o Brasil: número de dias no ano com precipitação superior ou igual a 1 mm (R1mm).

O R1mm na Região Centro-Oeste inicia a primeira década (1980-1989) com predominância total de anomalias positivas, com leve redução de predominância na década seguinte (1990-1999), passando para um cenário de dominância de anomalias negativas (2000-2009) e na década seguinte (2010-2019) há uma intensificação

dessas anomalias, passando a representar a região toda. Nas duas primeiras décadas, 1980-1989 e 1990-1999, ocorre uma predominância de anomalias positivas para o R1mm na Região Sudeste, seguidas pela década de 2000-2009 em que prevaleceram as anomalias negativas, com predominância total na região por anomalias negativas na década de 2010-2019. O R1mm na Região Sul inicia a primeira década com predominância expressiva de anomalias positivas para a região, passando para a década seguinte com predominância total de anomalias positivas, revertida a uma predominância de anomalias negativas para a década que se segue, que se intensifica e preenche totalmente a região na última década avaliada.

O R20mm (Figura 6) apresenta a década de 1980-1989 com variação positiva para a Região Norte, com incremento significativo de variação negativa, que passa a ser prevalente na década de 1990-1999, mas mantendo pontos de variação positiva, revertido novamente para prevalência de anomalias positivas na década de 2000-2009 e fechando o período com predominância de anomalias negativas no período entre 2010 e 2019. Evidenciando que, assim como o R1mm, o número de dias com precipitação acima de 20 mm na região foi reduzindo ao longo do período total. A Região Nordeste apresenta uma primeira década (1980-1999) com sutil predominância de anomalias positivas, seguido por uma década (1990-1999) de predominância de anomalias negativas, alternada por uma década seguinte com predominância quase total de anomalias positivas, voltando na última década (2010-2019) para a predominância de anomalias negativas. O R20mm na Região Centro-Oeste apresenta predominância positiva para a região nas três primeiras décadas (1980-1989, 1990-1999 e 2000-2009) e finaliza a última década (2010-2019) com predominância expressiva de anomalias negativas.

Na Região Sudeste, o R20mm apresenta prevalência de anomalias positivas no período entre 1980-1989, seguido pelo período de 1990-1999 onde a região apresenta prevalência de anomalias negativas, voltando à predominância de anomalias positivas de 2000-2009 e, por fim, apresenta predominância expressiva de anomalias negativas na década de 2010-2019. O R20mm na Região Sul inicia a primeira década em um cenário de sutil predominância de anomalias positivas, passando para as duas décadas seguintes em que predominaram anomalias positivas e finalizando com uma última década em que prevaleceram as anomalias negativas.

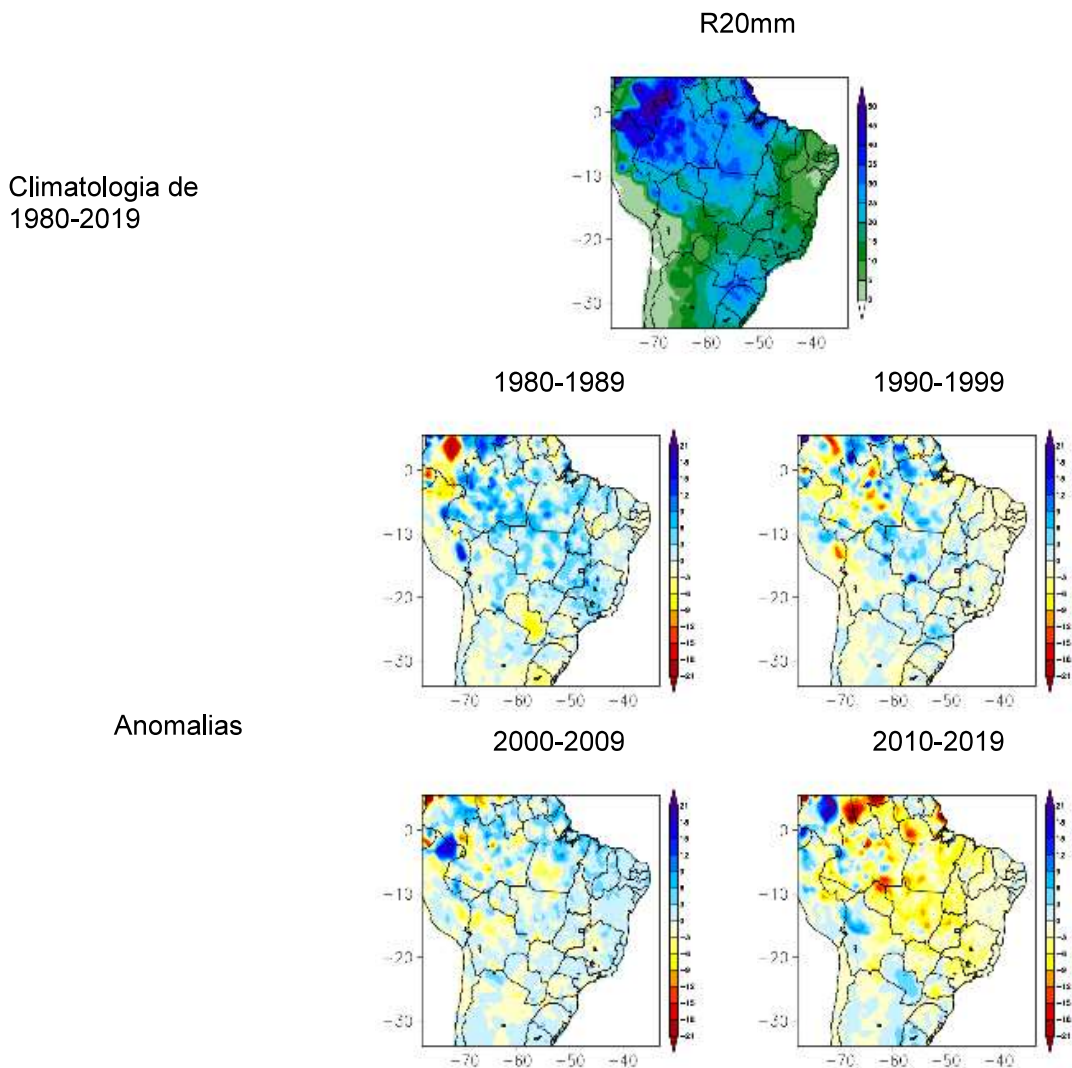


Figura 6. Climatologia (1980-2019) e anomalia decadal (1980-89, 1990-99, 2000-09 e 2010-19) em relação à climatologia do índice de extremo de precipitação observados para o Brasil: número de dias no ano com precipitação superior ou igual a 20 mm (R20mm).

O SDII (Figura 7) na Região Norte inicia com uma primeira década (1980-1989) com sutil predominância de anomalias positivas para esta região, situação invertida para uma predominância de anomalias negativas na década seguinte (1990-1999), voltando à predominância de anomalias positivas na década que se segue (2000-2009) e finalizando a última década com proximidade do equilíbrio, com sutil predominância de anomalias negativas (2010-2019), com pontos de maior intensidade para ambas as anomalias. O SDII na Região Nordeste apresentou prevalência de anomalias negativas para a década de 1980-1989, com uma leve redução na década seguinte, mas ainda em predominância, seguida por uma década apresentando prevalência de anomalias positivas e passando para a década de 2010-2019 próxima

a um equilíbrio entre as anomalias negativas e positivas. Na Região Centro-Oeste, o SDII apresenta uma predominância de anomalias positivas para as três primeiras décadas analisadas, revertida na última década para uma predominância de anomalias negativas.

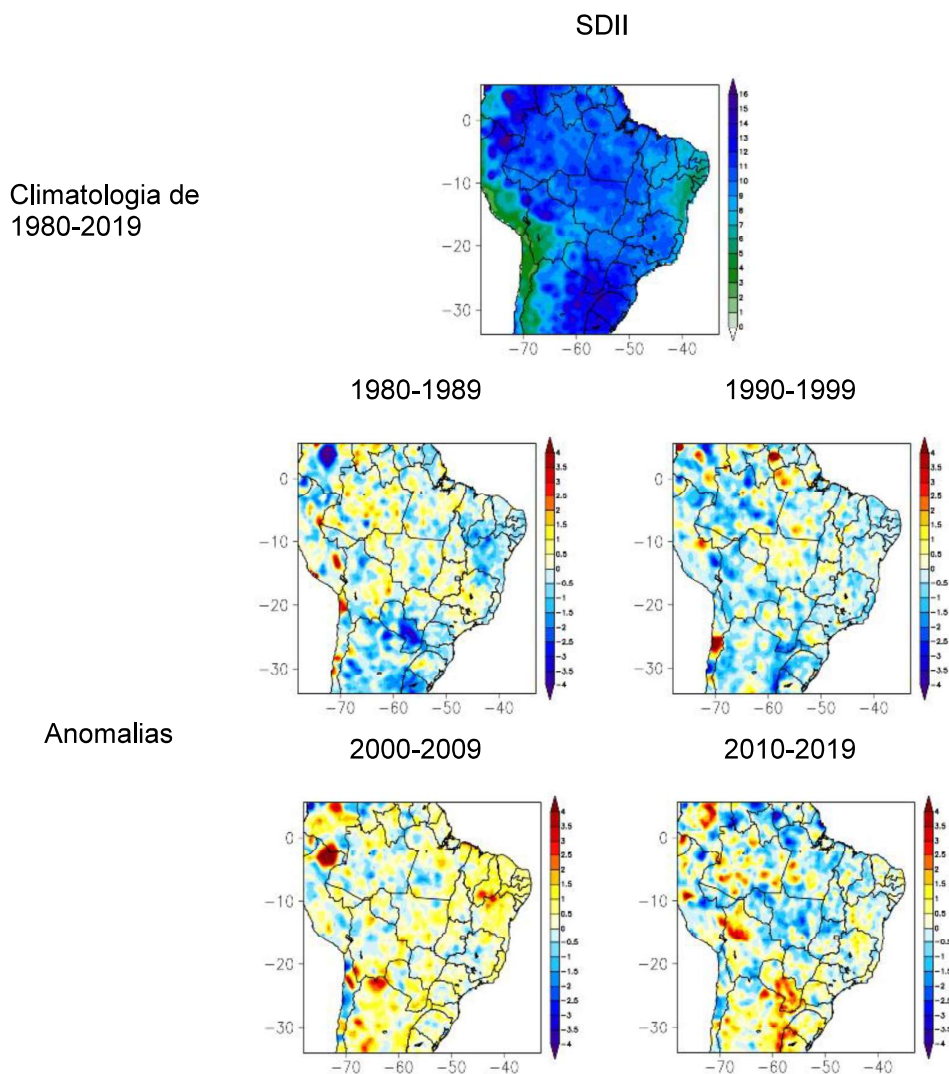


Figura 7. Climatologia (1980-2019) e anomalia decadal (1980-89, 1990-99, 2000-09 e 2010-19) em relação à climatologia do índice de extremo de precipitação observados para o Brasil: índice de intensidade de precipitação simples (SDII).

Na primeira década há uma predominância de anomalias positivas para o índice SDII na Região Sudeste, substituída por uma predominância de anomalias negativas na década seguinte, retornando à predominância de anomalias positivas na década seguinte, cenário mantido na última década de análise. Na Região Sul, o SDII apresenta predominância expressiva de anomalias negativas para o período de 1980-1989, com leve redução de predominância para o período entre 1990-1999, revertida

para uma expressiva predominância de anomalias positivas no período de 2000-2009, padrão que se manteve durante a década de 2010-2019.

A análise da aplicação dos índices climáticos ao longo das quatro décadas avaliadas aponta para variações significativas nos padrões de precipitação no Brasil, que podem sofrer influência direta de fenômenos climáticos como ENOS (*El Niño-Oscilação Sul*) e outros sistemas atmosféricos. O ENOS, composto pelo *El Niño* e *La Niña*, tem forte influência sobre a precipitação no Brasil, especialmente devido ao seu efeito na distribuição espacial e temporal das chuvas (INPE et al., 2024, KAYANO et al., 2016). Apesar disso, este não foi o foco do presente trabalho.

Os resultados observados para a Região Norte do Brasil, principalmente na década de 2010-2019, onde houve uma predominância de anomalias positivas para os índices PRCPTOT e R1mm podem, por sua vez, estar associados a efeitos de eventos de *La Niña*, que frequentemente acarreta aumento na quantidade de chuvas para esta região. Efeito semelhante pode ser observado para a Região Sul do país em períodos de influência deste ENOS, que também resulta em aumento da precipitação e intensidade das chuvas (INPE et al., 2024; KAYANO et al., 2016).

Na Tabela 1, está apresentada uma síntese de como os índices de extremos de precipitação avaliados no presente estudo variaram para cada região brasileira ao longo dos 40 anos de análise, de forma que a cor vermelha representa uma prevalência de anomalias negativas para o índice ao longo da década e a cor azul apresenta prevalência de anomalias positivas, com os seguintes índices de extremos: PRCPTOT, CDD, CWD, R1mm, R20mm e SDII.

Tabela 1. Síntese da variação de anomalias dos índices de extremos climáticos por regiões do Brasil para as quatro décadas avaliadas (1980-2019). As cores estão apresentadas de forma que índices em vermelho significam predominância de anomalias negativas e em azul significam predominância de anomalias positivas (índices em preto apresentam condições próximas ao equilíbrio entre as anomalias).

	Norte	Nordeste	Centro-Oeste	Sudeste	Sul
1980-1989	PRCPTOT CDD CWD R1mm R20mm SDII	PRCPTOT CDD CWD R1mm R20mm SDII	PRCPTOT CDD CWD R1mm R20mm SDII	PRCPTOT CDD CWD R1mm R20mm SDII	PRCPTOT CDD CWD R1mm R20mm SDII
1990-1999	PRCPTOT CDD CWD R1mm R20mm SDII	PRCPTOT CDD CWD R1mm R20mm SDII	PRCPTOT CDD CWD R1mm R20mm SDII	PRCPTOT CDD CWD R1mm R20mm SDII	PRCPTOT CDD CWD R1mm R20mm SDII
2000-2009	PRCPTOT CDD CWD R1mm R20mm SDII	PRCPTOT CDD CWD R1mm R20mm SDII	PRCPTOT CDD CWD R1mm R20mm SDII	PRCPTOT CDD CWD R1mm R20mm SDII	PRCPTOT CDD CWD R1mm R20mm SDII
2010-2019	PRCPTOT CDD CWD R1mm R20mm SDII	PRCPTOT CDD CWD R1mm R20mm SDII	PRCPTOT CDD CWD R1mm R20mm SDII	PRCPTOT CDD CWD R1mm R20mm SDII	PRCPTOT CDD CWD R1mm R20mm SDII

A Figura 8 apresenta os resultados obtidos através da análise de tendência para os índices em estudo, cobrindo todo o período de análise, de 1980 a 2019, de forma que os valores apresentados na escala de graduação refletem uma variação anual ao longo dos 40 anos avaliados. Esta análise permite a identificação de padrões de aumento ou diminuição de frequência ou intensidade de eventos extremos, como períodos de seca e precipitações intensas, ao longo das últimas décadas. As tendências são apresentadas espacialmente, permitindo que sejam evidenciadas áreas mais vulneráveis ou com maior resiliência às mudanças nos extremos climáticos, sendo que as áreas hachuradas indicam regiões em que as tendências identificadas apresentam significância estatística de pelo menos 90% (p -valor de 0,1), o que aponta para uma alta confiança na existência de uma tendência real nessas áreas. Desta forma, a análise de tendência é crucial para compreender a dinâmica climática apresentada.

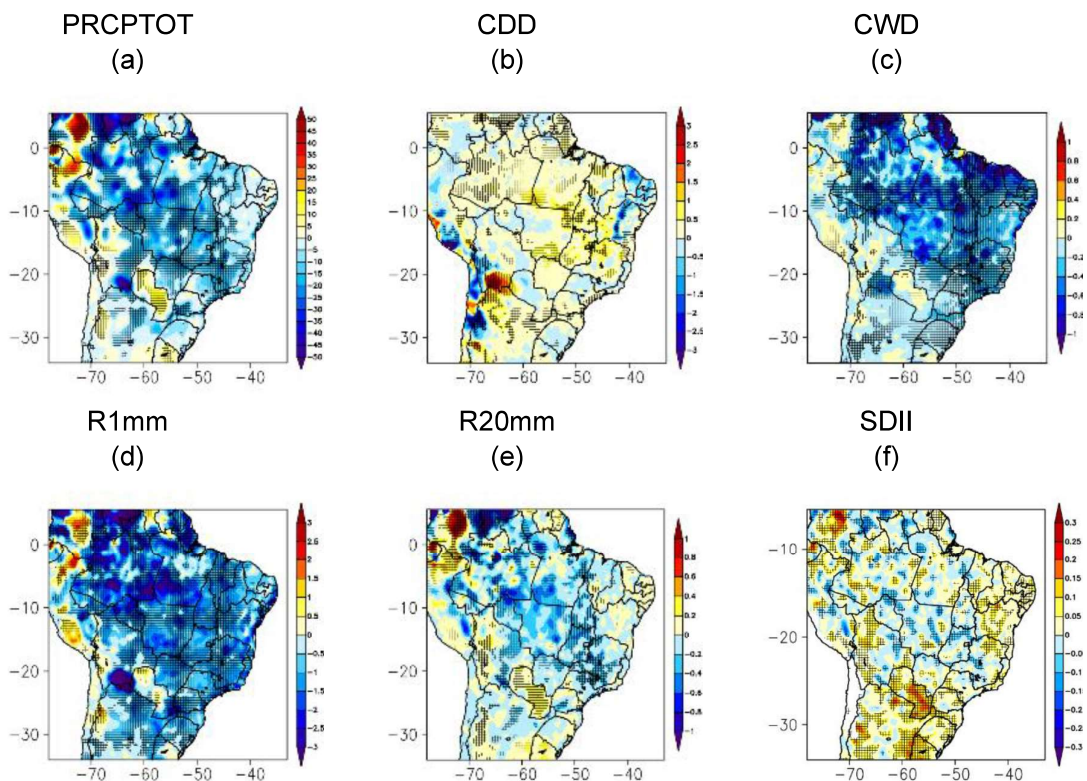


Figura 8. Tendência anual dos índices de extremos de precipitação observados para o Brasil entre 1980 e 2019: (a) precipitação anual (PRCPTOT), (b) número máximo de dias consecutivos com precipitação inferior a 1 mm (CDD), (c) número máximo de dias consecutivos com precipitação igual ou superior a 1 mm (CWD), (d) número de dias no ano com precipitação superior ou igual a 1 mm (R1mm), (e) número de dias no ano com precipitação superior ou igual a 20 mm (R20mm) e (f) índice de intensidade de precipitação simples (SDII).

A PRCPTOT (Figura 8a) apresenta uma tendência de redução para quase todo o Brasil ao longo dos 40 anos, com reduções mais expressivas na Amazônia, Roraima, Tocantins, Pará e Amapá.

A análise de tendência do índice CDD (Figura 8b) aponta para um aumento de dias consecutivos secos em boa parte do território brasileiro, ao longo dos 40 anos analisados. Grande parte das regiões Norte e Centro-Oeste apresentam essa tendência de aumento do CDD, com maior intensidade em algumas porções dos estados da Amazônia, Pará e Mato Grosso, em especial próximo à divisa entre esses 3 estados. Na Região Nordeste há um equilíbrio na variação espacial entre variações positivas e negativas, com tendência de redução do CDD para estados como Rio Grande do Norte e Paraíba. Além disso, é possível observar uma linha que cruza a Bahia centralmente indo do sul até o norte do estado, que juntamente com uma porção do Ceará, apresentam as variações mais intensas de redução para este índice.

Já o CWD (Figura 8c) apresenta tendência de variação negativa para quase a totalidade do Brasil, especialmente na porção mais ao norte da região Nordeste, algumas porções da Amazônia, Pará, Tocantins e Mato Grosso. O R1mm (Figura 4d) apresenta aproximadamente a mesma tendência, com quase todo o país contido em regiões em que houve variação negativa, podendo ser observado que a variação possui maior intensidade em trechos expressivos da Amazônia e Amapá, além de uma grande faixa do Pará e de Roraima, bem como parte do litoral nordestino.

O R20mm (Figura 8e), por sua vez, apresenta uma menor predominância de variação negativa no Brasil. Por outro lado, considerando as regiões de significância estatística, estas estão se sobrepondo quase que unanimemente com regiões onde há a presença de variação negativa para este último índice, sendo observado algumas porções de redução expressiva em pontos da Amazônia, Pará, Roraima e Mato Grosso.

Por último, a tendência para o SDII (Figura 8f) apresenta sutil predominância de regiões de aumento para este índice no território brasileiro ao longo dos 40 anos avaliados, com porções de aumento em grande parte do Nordeste e Sul do país, predominância de diminuição para o Centro-Oeste, suave prevalência de aumento para o Sudeste e equilíbrio de variação para a região Norte.

Na Tabela 2, estão apresentadas as amplitudes da variação média anual da tendência dos índices de extremos climáticos entre o período de 1980 e 2019, avaliadas para cada região do Brasil. De forma que o CDD apresentou maiores amplitudes de variação para a Região Nordeste do País, o CWD para as Regiões Norte e Centro-Oeste, o PRCPTOT e o R20mm apresentaram variações mais expressivas na Região Norte, para o R1mm as maiores amplitudes de variação foram notadas no Nordeste brasileiro e, por fim, o SDII apresenta maior amplitude de variação para a Região Norte.

Tabela 2. Amplitude da tendênciamédia anual de variação dos índices de extremos climáticos nas regiões do Brasil ao longo de 40 anos avaliados.

	Norte	Nordeste	Centro-Oeste	Sudeste	Sul
CDD (dias)	+1.5 e -0.5	+2.0 e -1.0	+1.5 e -0.5	+1.5 e -0.5	+1.0 e -0.5
CWD (dias)	+0.4 e -1.0	+0.0 e -1.0	+0.4 e -1.0	+0.0 e -0.8	+0.2 e -0.4
PRCPTOT (mm)	+15.0 e -50.0	+10.0 e -20.0	+0.0 e -35.0	+5.0 e -30.0	+5.0 e -20.0
R1mm (dias)	+2.0 e -3.0	+2.5 e -0.5	+0.0 e -2.0	+0.5 e -2.5	+0.5 e -2.0
R2mm (dias)	+0.4 e -1.0	+0.2 e -0.4	+0.2 e -0.8	+0.2 e -0.8	+0.2 e -0.4
SDII (mm/dia)	+0.2 e -0.15	+0.2 e -0.1	+0.1 e -0.15	+0.15 e -0.1	+0.15 e -0.05

Com tais resultados, podemos inferir que houve um aumento expressivo do número de dias consecutivos secos (CDD), com destaque para o incremento no período entre 2010-2019, apontando para uma tendência de seca mais prolongada e frequente em grande parte do Brasil. Associado a isso, há uma tendência de redução do número de dias consecutivos com precipitação igual ou superior a 1 mm (CWD), corroborando para esta tendência de um clima mais seco em boa parte do território do país (AVILA-DIAZ *et al.*, 2020; MARRAFON; REBOITA, 2020).

Um dos pontos de atenção é para o Amazonas, em que fica evidente o aumento da intensidade de eventos extremos, tanto quanto períodos secos quanto períodos úmidos. Os resultados estão em concordância com estudo realizado por Gloor *et al.* (2015), mostrando que há uma evidente variação no ciclo hidrológico do estado do Amazonas, com aumento de precipitações durante o período chuvoso e reduções observadas para o período seco (GLOOR *et al.*, 2015).

Para as Regiões Nordeste, Centro-Oeste e Sudeste do Brasil, fica evidente ao longo dos 40 anos avaliados uma transição para um clima mais seco, com tendência positiva para o índice CDD e negativa de índices como o CWD e R1mm. Tais resultados indicam que estas regiões estão sofrendo uma intensificação dos eventos secos e uma redução na precipitação total e na frequência de dias chuvosos, principalmente na última década avaliada (ÁVILA *et al.*, 2016, GIORGI *et al.*, 2019).

Com relação ao SDII, há uma discrepância entre os resultados obtidos neste estudo e os obtidos por outros autores. Em estudo realizado por Avila-Diaz *et al.* (2020) foram obtidos resultados que apontam para um aumento do SDII, para as Regiões Norte e Sudeste do Brasil, enquanto no presente estudo estas regiões apresentam equilíbrio de variação positiva e negativa, e redução deste índice para as Regiões Nordeste e Centro-Oeste, que no presente estudo apresentaram, respectivamente, variação positiva e negativa (AVILA-DIAZ *et al.*, 2020). Vale ressaltar que a discrepância observada pode estar relacionada ao fato de que o período histórico avaliado pelos autores abrange os anos entre 1980 e 2016, o que pode ser uma grande fonte de variação com os resultados obtidos no presente estudo, uma vez que as variações mais expressivas para os índices ocorreram no período entre 2010 e 2019.

Em contrapartida, o estudo realizado por Marrafon e Reboita (2020) sugere uma variação negativa para o SDII na Região Norte do país e redução deste índice

para a região Nordeste (MARRAFON; REBOITA, 2020). Apresentando assim resultados que estão em discordância tanto com os obtidos no presente estudo, quanto com os obtidos por Avila-Diaz *et al.* (2020), para este índice, nessas duas regiões específicas.

4.2. AVALIAÇÃO DOS ÍNDICES DE EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO: EC-Earth3-Veg-LR

Na Figura 4 são apresentadas as análises de viés do modelo EC-Earth3-Veg-LR para os índices de extremos de precipitação, de forma a permitir avaliar a destreza deste modelo em simular os índices de extremos de precipitação para o período histórico (1981-2010) em relação aos índices de extremos observados (CPC). Assim, podemos aferir se o modelo representa bem, subestima ou superestima cada um dos índices de extremos.

A PRCPTOT (Figura 9a) apresenta superestimação sutil para os estados do Acre, Roraima, Tocantins, parte da Amazonia e sudeste do Pará, com subestimação também sutil para o restante da Região Norte, exceto o norte do estado do Pará e Amapá, que apresentam subestimação considerável. Na Região Nordeste, a PRCPTOT aponta uma prevalência de superestimação sutil para quase toda a Região, exceto um trecho no norte do Maranhão e parte do litoral da Bahia, que apresentam subestimação. Na Região Centro-Oeste, a PRCPTOT é predominantemente superestimada, exceto em pequenos trechos do Mato Grosso e Mato Grosso do Sul. Em quase toda a Região Sudeste há predomínio de superestimação, exceto um estreito trecho do litoral paulistano. Na Região Sul há áreas com superestimação e subestimação, sendo a superestimação mais expressiva no sudeste de Santa Catarina e no nordeste do Rio Grande do Sul.

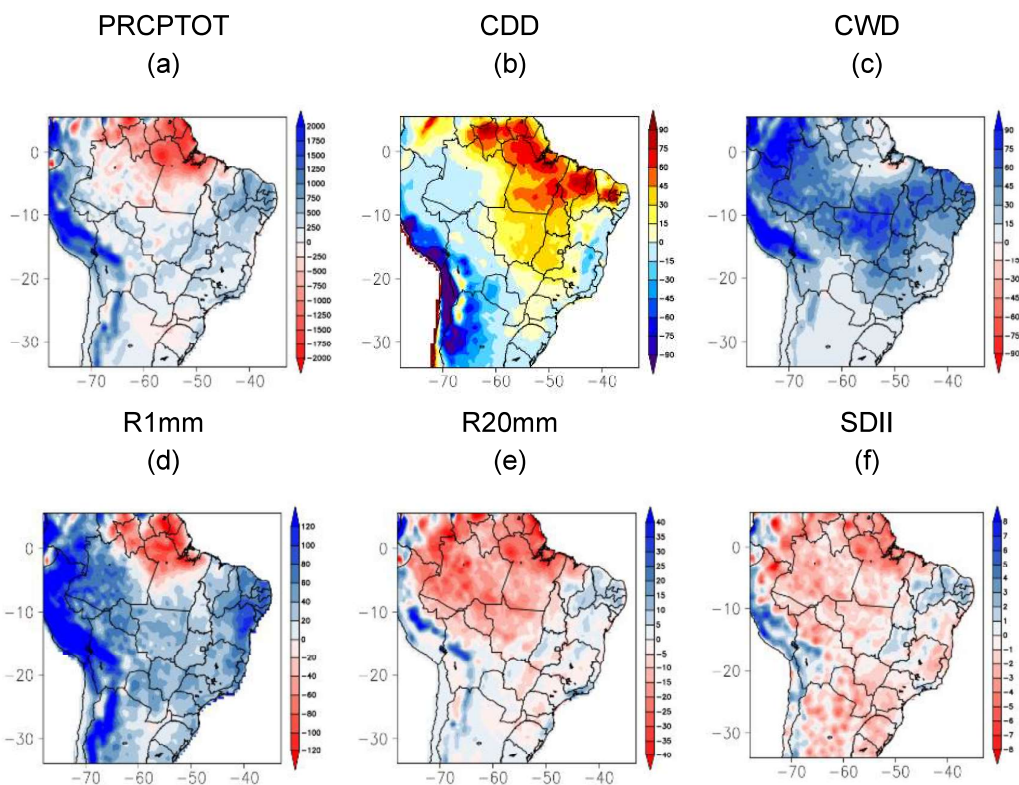


Figura 9. Viés dos índices de extremos de precipitação simulados pelo modelo EC-Earth3-Veg-LR em relação aos índices de extremos observados para o Brasil entre 1981 e 2010: (a) precipitação anual (PRCPTOT), (b) número máximo de dias consecutivos com precipitação inferior a 1 mm (CDD), (c) número máximo de dias consecutivos com precipitação igual ou superior a 1 mm (CWD), (d) número de dias no ano com precipitação superior ou igual a 1 mm (R1mm), (e) número de dias no ano com precipitação superior ou igual a 20 mm (R20mm) e (f) índice de intensidade de precipitação simples (SDII).

Em relação ao índice CDD (Figura 9b), pode-se observar que no estado do Acre há uma subestimação, padrão também observado para parte do oeste do Amazonas e Roraima, com superestimação para o restante da região, especialmente no norte e nordeste do Pará, sudoeste do Amapá e norte de Roraima. No restante da Região Norte, o modelo tende a superestimar valores para este índice. Na Região Nordeste, o CDD apresenta predominância de superestimação, especialmente na porção norte desta região, como Maranhão e Piauí. Os trechos com sutil subestimação ficam concentrados na região litorânea dos estados da Bahia, Sergipe, Alagoas, Pernambuco e Paraíba, sendo mais abrangente no estado da Bahia. Superestimação do CDD quase totalmente predominante na Região Centro-Oeste, sendo mais perceptível na porção leste do Mato Grosso e boa parte de Goiás, com subestimação presente em parte do sudoeste do Mato Grosso do Sul.

O CDD na Região Sudeste está próximo do equilíbrio entre superestimação e subestimação. Há subestimação no sudeste do estado de São Paulo, todo o Rio de

Janeiro e Espírito Santo e porção leste do estado de Minas Gerais. Com superestimação para a porção oeste de Minas Gerais e o restante do estado de São Paulo. Para a Região Sul, com relação ao CDD, podemos observar equilíbrio entre as porções onde há subestimação e superestimação, sendo ambos os casos em escala sutil.

Já para o índice CWD (Figura 9c), o modelo tende a superestimar quase toda a Região Norte, especialmente no oeste do Amazonas e sul do Pará, com um pequeno trecho no norte do Pará que apresenta subestimação; enquanto toda Região Norte do país há superestimação, especialmente na porção centro-norte desta região. O CWD tende a apresentar valores superestimados para toda a Região Centro-Oeste, sendo mais expressiva na porção centro e norte do estado do Mato Grosso. Padrão também observado para toda a Região Sudeste, especialmente na porção noroeste do estado de São Paulo e sudoeste de Minas Gerais. O CWD na Região Sul, como o observado em todas as outras regiões do país, apresenta superestimação de valores, mas que se apresenta, de forma geral, mais sutil nesta região do que na maior parte do restante do Brasil.

O R1mm (Figura 9d) apresenta superestimativa em boa parte da Região Norte, exceto parte do nordeste do Amazonas, norte do Pará, todo Roraima e Pará, que apresentam subestimação considerável, e também superestima os valores deste índice para toda a Região Nordeste, de forma mais expressiva na porção central e leste da Bahia. O R1mm tende a ser superestimado em toda a Região Centro-Oeste, especialmente na porção oeste do Mato Grosso do Sul e trechos esparsos do Mato Grosso. O R1mm é superestimado em toda a Região Sudeste do Brasil. O R1mm apresenta superestimação em toda a Região Sul, sendo mais expressiva em porções do Paraná, sudeste de Santa Catarina e na divisa dessa porção do estado com Rio Grande do Sul.

Já o R20mm (Figura 9e) apresenta subestimação em toda a Região Norte do país, sendo mais expressiva no estado do Amapá, exceto um pequeno trecho do sudeste do Tocantins, que apresenta leve superestimação. O R20mm apresenta, predominantemente, superestimação na Região Nordeste, exceto a porção norte do Maranhão e algumas porções da Bahia e Sergipe. O R20mm apresenta valores de superestimação em boa parte do estado de Goiás, uma porção no sul do Mato Grosso e na porção noroeste do Mato Grosso do Sul, com subestimação para o restante da região. O R20mm apresenta predominância de subestimação na Região Sudeste e

na Região Sul, exceto na porção leste de Santa Catarina, sudeste e sudoeste do Rio Grande do Sul e pequenas porções do Paraná.

Por fim, para o SDII (Figura 9f), podemos observar a ocorrência de subestimação em praticamente toda a Região Norte, especialmente no norte do norte do Amapá e todo o Pará, com sutil superestimação no sul do Tocantins. Na Região Nordeste, para o SDII é possível observar uma proximidade de equilíbrio entre a proporção de regiões com superestimação e subestimação, sendo o segundo caso quase predominante no estado da Bahia e porção norte do Maranhão, além de contemplar toda a região litorânea do Nordeste. O SDII Região Centro-Oeste aponta para uma sutil predominância de subestimação de valores no Centro-Oeste do Brasil, com prevalência de superestimação restrita ao estado de Goiás e uma pequena porção do Mato Grosso. Na Região Sudeste, o SDII apresenta predominantemente porções de subestimação, exceto uma porção da divisa entre os estados de São Paulo e Rio de Janeiro e uma porção de Minas Gerais. Para o SDII podemos observar quase que predominância total de subestimação de valores, exceto no sudeste de Santa Catarina e na divisa dessa porção do estado com o Rio Grande do Sul.

De forma geral, o modelo EC-Earth3-Veg-LR apresenta um desempenho misto na representação dos diferentes índices de precipitação analisados para as regiões do Brasil, apresentando variações tanto de superestimação quanto de subestimação. Fica possível assim avaliar, com base nos graus de variação de viés do modelo, que o mesmo possui capacidade razoável em capturar o padrão geral de variação dos índices aplicados. Por outro lado, para o sul da Amazônia e Sudeste do Brasil, estudos apontam que o EC-Earth3-Veg-LR apresenta bom desempenho em diferentes estações, em especial para as com maior precipitação, sugerindo que este é uma opção adequada para estudos de projeção climática em escala regional (Oliveira *et al.*, 2023).

4.3. ÍNDICES DE EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO: CENÁRIOS FUTUROS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Nas Figuras 10 e 11 estão apresentadas as análises comparativas entre os cenários futuros de mudanças climáticas do modelo EC-Earth3-Veg-LR para os índices de extremos, de forma a permitir a avaliação da variação destes índices para

o futuro, a partir da comparação entre os cenários de emissão SSP1-2.6 e SSP5-8.5 com o modelo histórico. Foram considerados dois cenários temporais na análise, futuro próximo (2041 a 2070) e futuro distante (2071 a 2100), a fim de verificar como os índices estão variando ao longo desses períodos para os SSPs.

No cenário SSP1-2.6 (Figuras 10a-b) para o futuro próximo (2041-2070), na Região Norte o índice PRCPTOT apresenta variação predominantemente negativa para a região, abrangendo boa parte do Amazonas, que apresenta as maiores intensidades de variação. Para o futuro distante (2071-2100) a abrangência espacial da variação negativa aumenta, juntamente com a sua intensidade no Amazonas. No futuro próximo o SSP5-8.5 (Figuras 10c-d) apresenta predominância expressiva área com variação negativa para o índice citado, com intensidade mais expressiva especialmente no Amazonas. No futuro distante a área de abrangência da variação negativa é sutilmente reduzida, mas há um incremento expressivo em intensidade, em especial no Amazonas.

Para o PRCPTOT (Figura 10), no cenário SSP1-2.6 para o futuro próximo (2041-2070), na Região Norte o índice PRCPTOT apresenta variação predominantemente negativa para a região, abrangendo boa parte do Amazonas, que apresenta as maiores intensidades de variação. Para o futuro distante (2071-2100) a abrangência espacial da variação negativa aumenta, juntamente com a sua intensidade no Amazonas. No futuro próximo o SSP5-8.5 apresenta predominância expressiva área com variação negativa para o índice citado, com intensidade mais expressiva especialmente no Amazonas. No futuro distante a área de abrangência da variação negativa é sutilmente reduzida, mas há um incremento expressivo em intensidade, em especial no Amazonas.

Na Região Nordeste, para o índice PRCPTOT há predominância de diminuição do índice no SSP1-2.6 para o futuro próximo, evoluindo para quase toda a região no período seguinte, com sutil incremento de intensidade em uma faixa da porção leste do Nordeste. No SSP5-8.5 também há predominância da variação de diminuição do índice para o futuro próximo, mais intensa na porção leste da região, com sutil variação para o futuro distante, mas aumento da área de abrangência da porção mais intensa, incluindo agora uma porção no norte do Ceará e Maranhão.

Na Região Centro-Oeste, para o índice PRCPTOT há uma sutil predominância de redução do índice no SSP1-2.6 para o futuro próximo, evoluindo para uma

prevalência para quase toda a região no futuro distante, com porções do estado de Goiás apresentando incremento de intensidade. No futuro próximo para o SSP5-8.5, o PRCPTOT apresenta expressiva dominância de variação negativa, que se torna ainda mais pronunciada no período seguinte, com incremento de intensidade na porção noroeste do Mato Grosso, próximo à divisa com o Amazonas.

Na Região Sudeste, o índice PRCPTOT apresenta predominância de variação positiva no futuro próximo, revertida para uma predominância de variação negativa no futuro distante, para o SSP1-2.6. Já o SSP5-8.5 inicia o futuro próximo já com uma sutil predominância negativa para este índice, cuja abrangência espacial aumenta no futuro distante.

O PRCPTOT para o SSP1-2.6 na Região Sul apresenta um futuro próximo com predominância expressiva de variação positiva, com pouca variação negativa na abrangência espacial deste índice para o futuro distante. No futuro próximo, também para este índice, o SSP5-8.5 apresenta dominância espacial da variação positiva, mas com intensidade maior que o SSP anterior em boa parte do Rio Grande do Sul, toda Santa Catarina e uma porção no sul do Paraná. A predominância positiva se mantém para o futuro distante, porém há uma intensificação da variação, observada em porções do Rio Grande do Sul e Santa Catarina.

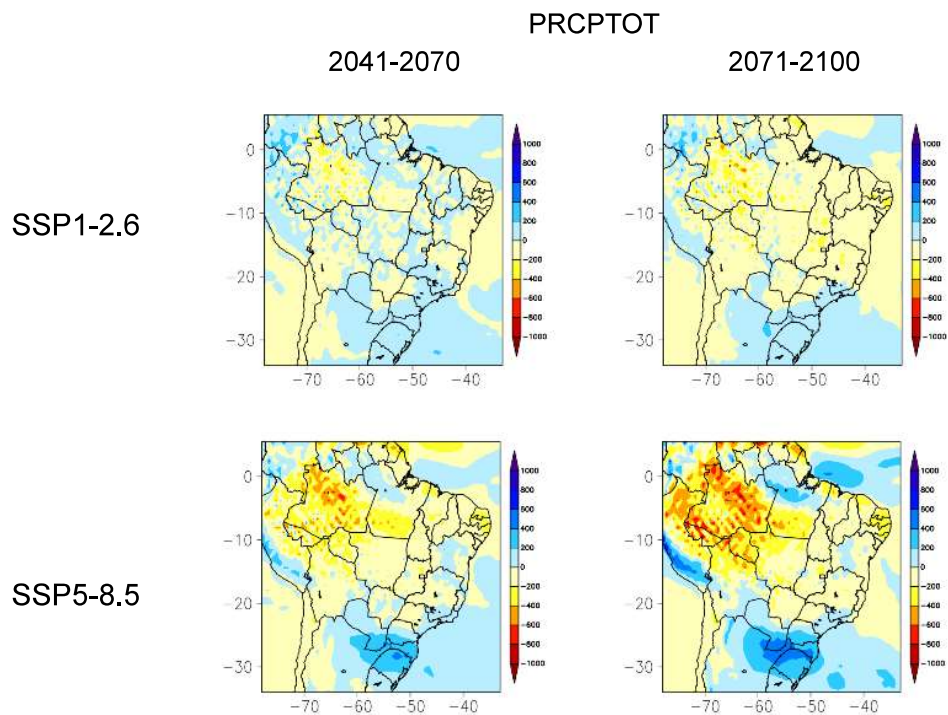


Figura 10. Índice de extremo PRCPTOT de precipitação para o Brasil para: diferença entre o cenário futuro SSP1-2.6 (2041-2070) e o experimento histórico (1981-2010); diferença entre

o cenário futuro SSP1-2.6 (2071-2100) e o experimento histórico (1981-2010); diferença entre o cenário futuro SSP5-8.5 (2041-2070) e o experimento histórico (1981-2010); e diferença entre o cenário futuro SSP 5-8.5 (2071-2100) e o experimento histórico (1981-2010).

Em relação ao índice CDD (Figura 11), para o cenário de emissão SSP1-2.6 aplicado ao futuro próximo (2041-2070), na Região Norte do país o índice apresenta uma predominância de intensificação, principalmente na porção leste, sendo que no futuro distante (2071-2100) essa intensificação se apresenta ainda mais severa, em especial no Tocantins e no Pará. Já no cenário SSP5-8.5, podemos observar que a predição de aumento do índice se torna espacialmente mais abrangente e apresenta trechos com maior intensidade para o futuro próximo que em ambos os casos anteriores, principalmente na porção leste da Região Norte, além de parte da porção leste do Amazonas. Para o futuro distante, fica evidente a máxima variação de aumento na intensidade do CDD, que agora abrange completamente a Região Norte do país, com principal efeito sobre o estado de Roraima, boa parte de Rondônia e uma porção do leste da Amazonas.

Na Região Nordeste, predomina aumento do índice CDD no SSP1-2.6 em ambos os períodos, sendo que no futuro próximo algumas porções da Bahia e sul do Maranhão apresentam maiores intensidades e para o futuro distante o aumento da intensidade abrange quase toda a Região, em especial a Bahia, o Maranhão e o Ceará. A variação de aumento também abrange totalmente a Região Nordeste para ambos os cenários temporais, com maior intensidade que os cenários anteriores, mas menos intensa que o cenário futuro no SSP5-8.5.

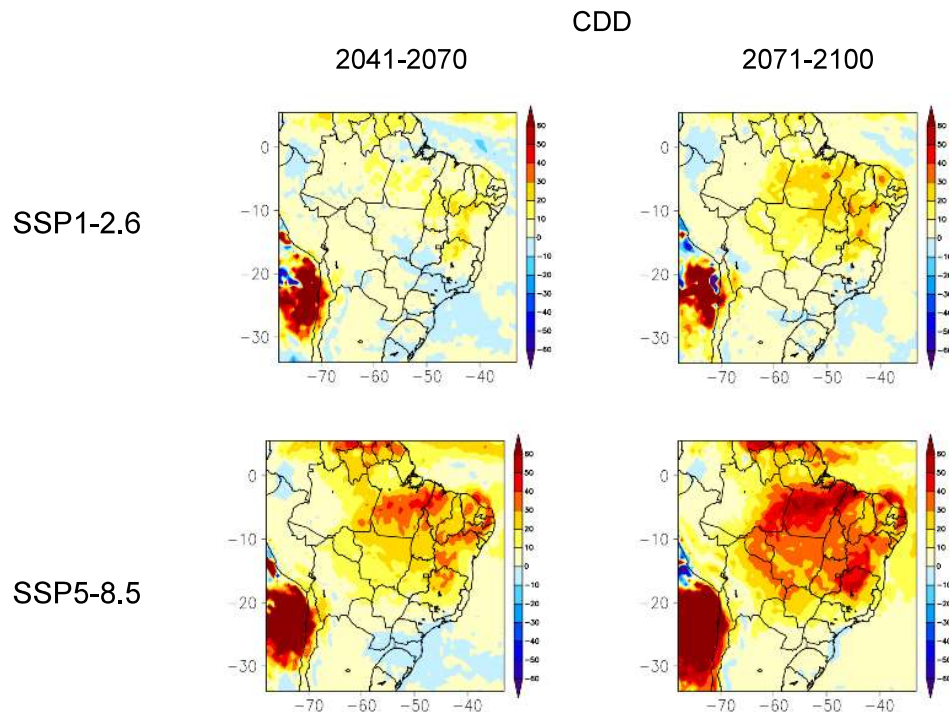


Figura 11. Índice de extremo CDD de precipitação para o Brasil para: diferença entre o cenário futuro SSP1-2.6 (2041-2070) e o experimento histórico (1981-2010); diferença entre o cenário futuro SSP1-2.6 (2071-2100) e o experimento histórico (1981-2010); diferença entre o cenário futuro SSP5-8.5 (2041-2070) e o experimento histórico (1981-2010); e diferença entre o cenário futuro SSP 5-8.5 (2071-2100) e o experimento histórico (1981-2010).

Em relação ao índice CWD (Figura 12), no cenário SSP1-2.6 para o futuro próximo, na Região Norte do Brasil há uma sutil predominância de redução, sendo mais evidente nos estados do Amazonas e Roraima, com aumento da abrangência espacial para o futuro distante, ocupando quase todo o estado primeiramente citado, além de boa parte do Acre, de Rondônia e do Pará. No cenário SSP5-8.5, a predominância da variação de diminuição do índice é mais pronunciada, com regiões de maior intensidade do que nos cenários de emissões anteriores para os estados do Amazonas e Pará. A abrangência espacial não varia significativamente para o futuro distante no SSP5-8.5, mas a variação da intensidade é evidente, afetando boa parte da porção oeste e sudeste da região.

Na Região Nordeste, predomina redução do índice CWD no futuro próximo do SSP1-2.6 e abrange a região quase por completo no futuro distante. No SSP5-8.5 a abrangência espacial da variação de diminuição do índice é prevalente, mas se mantém semelhante no futuro distante.

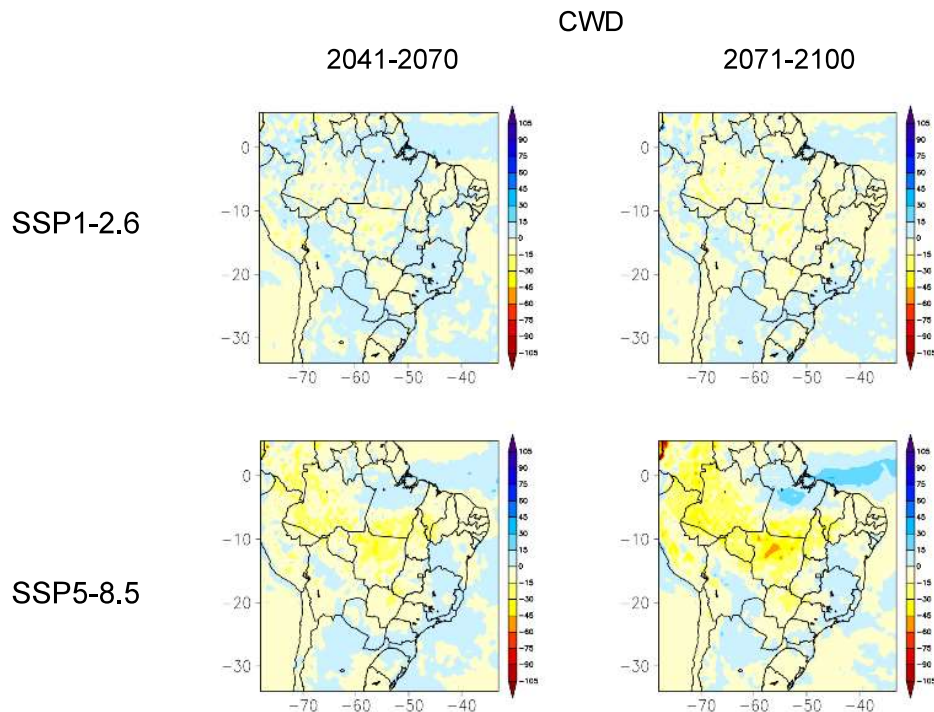


Figura 12. Índice de extremo CWD de precipitação para o Brasil para: diferença entre o cenário futuro SSP1-2.6 (2041-2070) e o experimento histórico (1981-2010); diferença entre o cenário futuro SSP1-2.6 (2071-2100) e o experimento histórico (1981-2010); diferença entre o cenário futuro SSP5-8.5 (2041-2070) e o experimento histórico (1981-2010); e diferença entre o cenário futuro SSP 5-8.5 (2071-2100) e o experimento histórico (1981-2010).

O R1mm (Figura 13) apresenta, na Região Norte, área de redução expressiva para o futuro próximo e quase total para o futuro distante na Região, para o SSP1-2.6, com aumento de intensidade da redução para o segundo período. Para o SSP5-8.5 a abrangência espacial da variação de redução se apresenta quase total para o futuro próximo, com maiores intensidades principalmente no estado do Amazonas, onde no futuro distante a redução do índice para este estado é expressiva, além de uma porção de Rondônia e do Acre.

Na Região Nordeste, SSP1-2.6 para o R1mm é possível observar expressiva predominância de variação negativa no futuro próximo, em especial numa porção no sudeste da Bahia, que passa a abranger totalmente o Nordeste no futuro distante, além de incremento na intensidade da variação negativa em boa parte da Bahia e no leste costeiro. Para o SSP5-8.5 há predominância espacial total da variação negativa deste índice, mais intenso em toda a região costeira do sul da Bahia até o Rio Grande do Norte, no futuro próximo. Variação que se intensifica no futuro distante, principalmente na região costeira supracitada.

O R1mm na Região Centro-Oeste é caracterizado por uma variação negativa na região quase por completo, com incremento de intensidade entre o futuro próximo e o futuro distante, para o SSP1-2.6. O SSP5-8.5 apresenta abrangência espacial semelhante às do cenário de emissões anterior, mas com intensidade maior de variação negativa já no futuro próximo, que intensifica ainda mais no futuro distante, em especial na região noroeste do Mato Grosso, próximo às divisas com o Amazonas e Rondônia.

A Região Sudeste apresenta variação predominantemente negativa para ambos os cenários temporais no SSP1-2.6, em relação ao R1mm, com incremento de intensidade na porção norte do estado de Minas Gerais para o futuro distante. A distribuição espacial predominantemente negativa se mantém para o futuro próximo do SSP5-8.5, com incremento tanto espacial quanto em intensidade para o futuro distante, neste SSP, abrangendo a região quase por completo

A Região Sul do Brasil apresenta, para o R1mm, um futuro próximo do SSP1-2.6 com proximidade ao equilíbrio espacial entre variações positivas e negativas, passando a um estado de predominância de variação positiva no futuro distante. Já no SSP5-8.5 há um incremento espacial da variação positiva no futuro próximo, com uma porção do leste de Santa Catarina com incremento de intensidade desta variação. No futuro distante, para este SSP, há uma reversão e a variação negativa passa a prevalecer na região como um todo, com maior intensidade na porção norte do estado o Paraná.

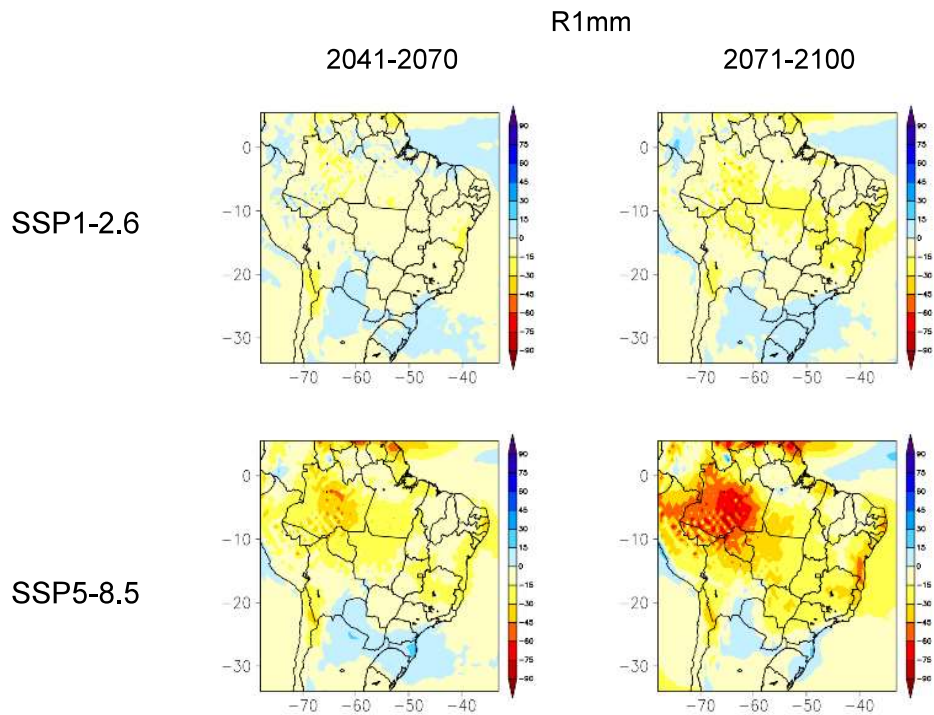


Figura 13. Índice de extremo R1mm de precipitação para o Brasil para: diferença entre o cenário futuro SSP1-2.6 (2041-2070) e o experimento histórico (1981-2010); diferença entre o cenário futuro SSP1-2.6 (2071-2100) e o experimento histórico (1981-2010); diferença entre o cenário futuro SSP5-8.5 (2041-2070) e o experimento histórico (1981-2010); e diferença entre o cenário futuro SSP 5-8.5 (2071-2100) e o experimento histórico (1981-2010).

O R20mm (Figura 14) variou positivamente em praticamente todo o território brasileiro, em todos os cenários analisados, com variação negativa restrita a pequenas porções da Região Nordeste. A variação positiva no futuro próximo do SSP1-2.6 apresentou maior intensidade principalmente nos estados do Rio Grande do Sul, uma porção do nordeste de São Paulo, parte de Minas Gerais e no Distrito Federal. No futuro distante, para o SSP citado, a variação positiva mais destoante ficou restrita a uma porção do nordeste de São Paulo. Já no SSP5-8.5 há uma variação positiva expressiva deste índice para boa parte dos estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina, no futuro próximo, que se intensifica ainda mais nessas regiões no futuro distante, abrangendo também o estado do Paraná e a porção oeste do Amazonas.

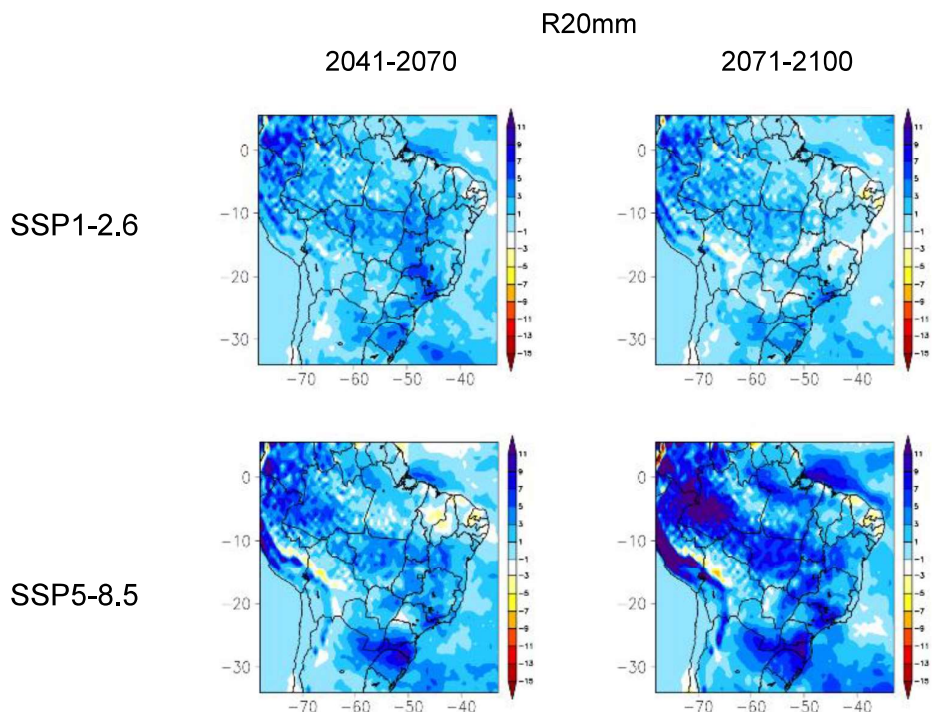


Figura 14. Índice de extremo R20mm de precipitação para o Brasil para: diferença entre o cenário futuro SSP1-2.6 (2041-2070) e o experimento histórico (1981-2010); diferença entre o cenário futuro SSP1-2.6 (2071-2100) e o experimento histórico (1981-2010); diferença entre o cenário futuro SSP5-8.5 (2041-2070) e o experimento histórico (1981-2010); e diferença entre o cenário futuro SSP 5-8.5 (2071-2100) e o experimento histórico (1981-2010).

Para o SDII (Figura 15) no SSP1-2.6 a distribuição da variação espacial e de intensidade do SDII se apresenta próxima do equilíbrio entre os cenários temporais na Região Norte, enquanto para este índice no SSP5-8.5 há uma predominância espacial da variação negativa no futuro próximo, que é revertida para uma predominância da variação positiva no futuro distante, com incremento expressivo na intensidade desta variação, especialmente na porção norte do estado do Pará e grande parte de Roraima.

Na Região Nordeste, o SDII apresenta variação predominantemente positiva para o futuro próximo do SSP1-2.6, que se reverte para predominância negativa no futuro distante. Este mesmo índice apresenta equilíbrio entre variações positivas e negativas no futuro próximo do SSP5-8.5, mas com maior intensidade de ambas as variações quando comparado aos dois cenários temporais no SSP anterior. Já no futuro distante do SSP5-8.5 há uma intensificação para a variação tanto positiva quanto negativa do índice, porém agora com prevalência espacial da variação positiva.

Na Região Centro-Oeste a variação positiva do SDII predomina em quase toda a região, para o SSP1-2.6 no futuro próximo, com maior intensidade no estado de Goiás e no Distrito Federal, com a predominância positiva se mantendo para o futuro distante neste cenário, mas com redução na intensidade nesta região. O SSP5-8.5 apresenta padrão semelhante no futuro próximo ao mesmo cenário temporal apresentado no SSP2-1.6 e um futuro distante com prevalência quase total para variação positiva para o índice, além de ocorrer uma intensificação desta variação em porções de Goiás, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul.

Por último, na Região Sul do Brasil, para o SSP1-2.6 há uma prevalência expressiva de variações positivas para o SDII, que perde sutilmente intensidade entre o futuro próximo e o futuro distante nesta região. No SSP5-8.5, para o futuro próximo, este índice também apresenta prevalência de variações positivas no futuro próximo, mais intensa do que em ambos os casos do SSP anterior e que se intensifica fortemente no futuro distante, principalmente na porção oeste da Região Sul.

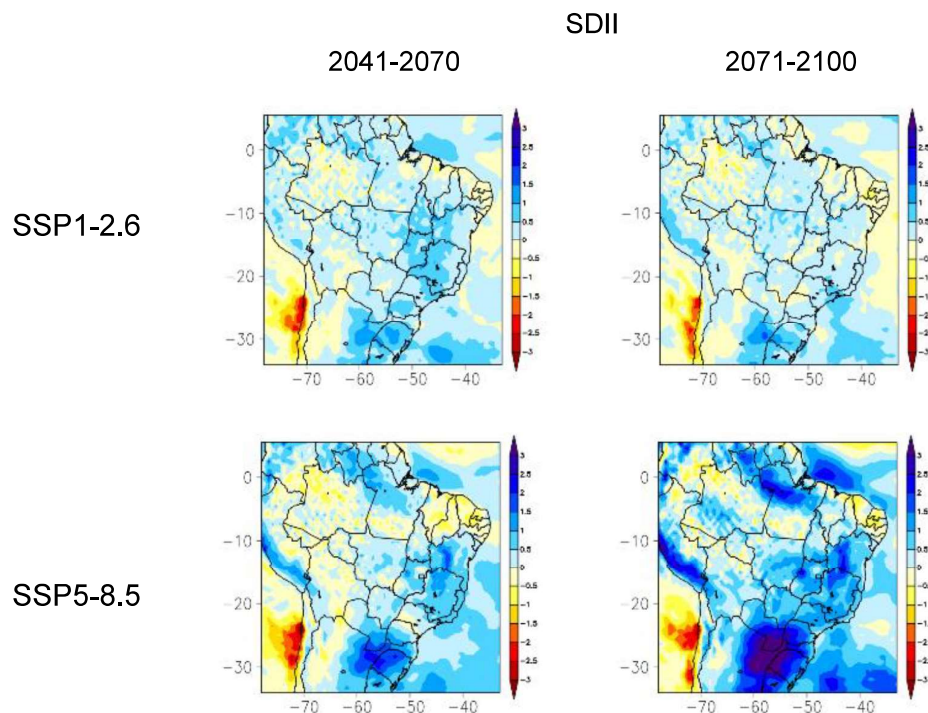


Figura 15. Índice de extremo SDII de precipitação para o Brasil para: diferença entre o cenário futuro SSP1-2.6 (2041-2070) e o experimento histórico (1981-2010); diferença entre o cenário futuro SSP1-2.6 (2071-2100) e o experimento histórico (1981-2010); diferença entre o cenário futuro SSP5-8.5 (2041-2070) e o experimento histórico (1981-2010); e diferença entre o cenário futuro SSP 5-8.5 (2071-2100) e o experimento histórico (1981-2010).

Os resultados apontam que, para o índice PRCPTOT, em especial para as Regiões Norte de Nordeste, há uma projeção de redução da precipitação total para os

cenários SSP1-2.6 e SSP5-8.5, tanto para o futuro próximo quanto distante, com intensificação principalmente no Amazonas e algumas áreas do Nordeste, fatos evidenciados em outros estudos, quando aplicados em cenários de emissões análogos aos SSPs (MARRAFON; REBOITA, 2020; ÁVILA-DIAZ *et al.*, 2020).

O IPCC expõe no AR6 apontamentos para projeções de diminuição da precipitação anual e sazonal para a Amazônia e partes do Nordeste, em cenários de altas emissões, afetando significativamente o ciclo hidrológico nestas regiões, consistente com a variação negativa do PRCPTOT obtida como resultado no presente estudo. Essa diminuição está associada à redução na frequência de eventos de chuva e aumento de períodos secos consecutivos (IPCC, 2022)

Para o CDD, em especial nas Regiões Norte e Nordeste, apresenta uma tendência de aumento no número de dias secos consecutivos, intensificado especialmente no cenário de emissões mais altos, reforçando uma tendência de maior aridez e aumento da frequência de secas (MARRAFON; REBOITA, 2020, ÁVILA-DIAZ *et al.*, 2020). Com relação ao CWD e ao R1mm, é possível identificar uma redução destes índices para as mesmas regiões, indicando uma redução nos dias de chuva, reforçando a análise anterior (ÁVILA-DIAZ *et al.*, 2020).

Os resultados também estão de acordo com o apontado pelo o AR6 do IPCC, que indica um aumento na frequência e intensidade de secas, especialmente em regiões tropicais como o Norte e o Nordeste do Brasil, associado a cenários de altas emissões. Estas alterações estão associadas tanto ao aumento das temperaturas médias quanto à redução da umidade, evidenciadas pela redução dos índices CWD e R1mm, tendo possíveis efeitos sobre a disponibilidade hídrica da região e aumento do risco de incêndios florestais, em especial na Amazônia (IPCC, 2022).

Para o R20mm, por outro lado, fica evidenciado um aumento deste índice para as regiões Sul e Sudeste, em especial para o cenário de emissões mais altas, com intensificação para estados como Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Esse aumento nos eventos de chuvas mais intensas aponta para riscos climáticos crescentes na região, especialmente em áreas propensas a enchentes, inundações e deslizamentos (ÁVILA-DIAZ *et al.*, 2020, IPCC, 2022).

Para a Região Norte, semelhante ao caso anterior, no cenário pessimista as projeções apontam para uma intensificação de chuvas, evidenciado pelo aumento do

SDII, apesar das projeções de diminuição do número de dias chuvosos. Esse aumento de intensidade indica para uma maior ocorrência de eventos extremos chuvosos na região (ÁVILA-DIAZ *et al.*, 2020, OLIVEIRA *et al.*, 2023).

A Figura 16 apresenta uma síntese dos resultados de desenvolvimento dos índices de extremos de precipitação avaliados até o ano de 2100, de acordo com as projeções obtidas pelos modelo EC-Earth3-Veg-LR. O SSP1-2.6 (mapa à esquerda) representa um cenário de desenvolvimento com baixas emissões de GEE, onde pode-se observar uma predominância de redução (em vermelho) nos índices climáticos avaliados em todas as Macrorregiões do país, exceto na Região Sul, indicando redução de extremos climáticos e impactos mais localizados, quando comparado ao cenário pessimista. Em contrapartida, o SSP5-8.5 (mapa à direita) representa um cenário de altas emissões, resultando em impactos climáticos intensificados. A ampliação de intensificação dos índices climáticos em todas as regiões do país indica um aumento de frequência e intensidade de extremos climáticos, quando comparado ao cenário otimista.

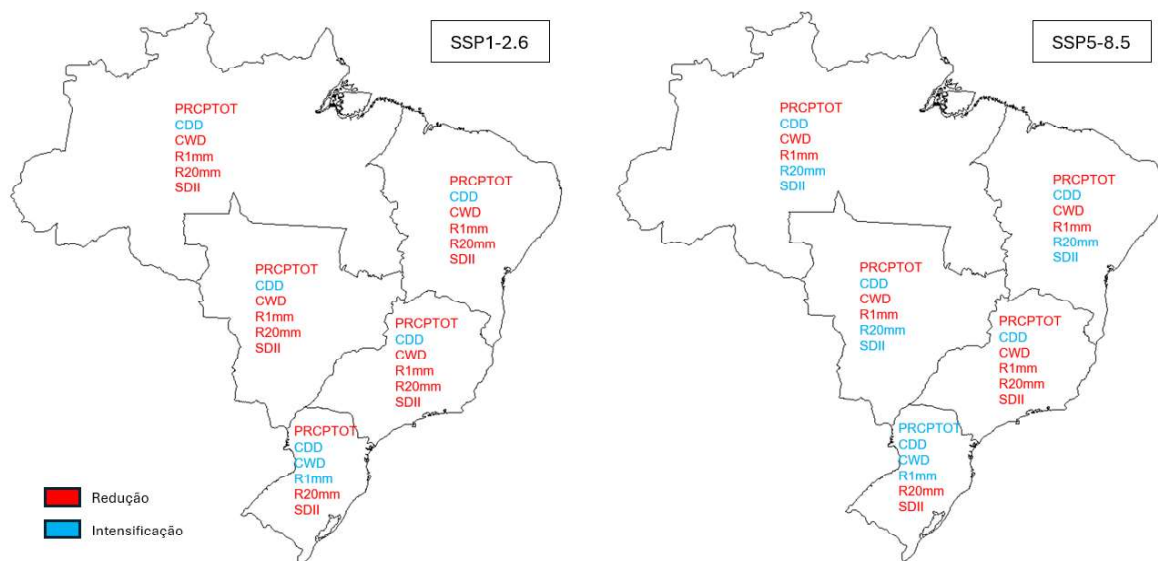


Figura 16. Síntese das projeções obtidas para os cenários de emissões avaliados (SSP1-2.6 e SSP5-8.5) utilizando o modelo de projeções climática EC-Earth3-Veg-LR, em que a coloração em vermelho representa uma redução do índice e em azul representa intensificação do índice.

5. CONCLUSÕES

Este estudo teve como objetivo avaliar a variabilidade e mudanças nos índices de extremos de precipitação no Brasil, no período histórico e em cenários futuros de mudanças climáticas. Os resultados obtidos com relação aos índices climáticos para o período histórico apresentam um padrão de aumento do número de dias secos consecutivos (CDD) em grande parte do Brasil, particularmente nas Regiões Norte e Centro-Oeste, com maior intensidade em áreas como Amazonas, Pará e Mato Grosso. Aliado a isso, há o padrão de variação negativa para o índice de dias úmidos consecutivos (CWD), especialmente em áreas das Regiões Norte e Nordeste, indicando uma redução na frequência de períodos de precipitação contínua. Os índices de precipitação moderada (R1mm) e precipitação mais intensa (R20mm) também apresentaram variação negativa em boa parte do país, com destaque para áreas do Amazonas e do litoral nordestino, sugerindo uma diminuição geral na ocorrência de precipitações frequentes e intensas no período de análise. O SDII apresentou um comportamento misto, com sutil predominância de variação positiva no Nordeste e Sul, sugerindo intensificação de chuvas em eventos isolados nestas regiões, e apresentou sutil predominância de variação negativa para o Centro-Oeste, apontando para uma leve tendência de redução na intensidade das chuvas.

Pela análise de tendência ficou evidenciado para o período histórico um aumento expressivo do CDD em diversas regiões do país, apontando para uma intensificação de período secos prolongados, especialmente no período do ano de 2010 a 2019. Esse comportamento reflete uma tendência de aridificação em várias regiões do país, em especial o Norte, Centro-Oeste e algumas porções do Nordeste. A predominância de variação negativa do CWD confirma tal tendência, sugerindo que períodos de chuva contínua reduziram significativamente ao longo das décadas de estudo.

As projeções futuras, obtidas com o EC-Earth3-Veg-LR indicam que, principalmente sob cenários de altas emissões, o CDD tenderá manter a intensificação em boa parte do território nacional, principalmente nas Regiões Norte e Nordeste, enquanto os índices CWD e R1mm tenderão a manter o padrão de redução de intensidade. Em contrapartida, o modelo aponta para uma intensificação da variação positiva do índice R20mm em áreas do Sul e Sudeste, sugerindo um aumento de

eventos extremos de precipitação nessas regiões. Essas projeções refletem um cenário climático futuro para um Brasil com secas mais frequência e duradoura, alternadas com eventos extremos de chuva em algumas áreas. Um ponto a ser levado em consideração é de que a análise quanto aos resultados das projeções deve ser feita com parcimônia, uma vez que eles carregam consigo o viés inerente ao modelo, que não foi desconsiderado ou suavizado neste estudo.

Há de se ressaltar que para o presente estudo foi feita aplicação de apenas um modelo climático, de forma que a inclusão e comparação de contrastes com os resultados de outros modelos traria maior robustez ao trabalho. O EC-Earth3-Veg-LR é um modelo de baixa resolução, que pode não capturar da forma mais adequada fenômenos climáticos em pequena escala, podendo reduzir a precisão da representação de padrões climáticos regionais. Portanto, embora o modelo aplicado ofereça projeções climáticas valiosas, estudos mais aprofundados e com a inclusão de outros modelos para comparação resultaria em incremento significativo dos resultados obtidos.

Por fim, os resultados e análises descritas no presente estudo apontam para uma intensificação dos períodos secos e uma redução dos dias consecutivos de chuva em grande parte do país, refletindo em um clima progressivamente mais seco e irregular, que é reforçado pelas projeções futuras, especialmente sob cenários de altas emissões. Estes resultados indicam que o Brasil pode enfrentar desafios crescentes em termos de gestão hídrica e adaptação climática, com secas mais prolongadas e maior frequência de eventos de precipitação extrema em diferentes porções do país, o que aumenta a vulnerabilidade das regiões e exige medidas de mitigação e adaptação.

REFERÊNCIAS

ALCÂNTARA, E. et al. Deadly disasters in southeastern South America: flash floods and landslides of February 2022 in Petrópolis, Rio de Janeiro. **Natural hazards and earth system sciences**, v. 23, n. 3, p. 1157-1175, 2023.

AVILA-DIAZ, A. et al. Assessing current and future trends of climate extremes across Brazil based on reanalyses and earth system model projections. **Climate Dynamics**, v. 55, n. 5, p. 1403-1426, 2020.

BARRY, R. G.; CHORLEY, R. J. 2013. *Atmosfera, Tempo e Clima*, 9ª ed. Bookman, Porto Alegre.

CARDOSO, C. S.; QUADRO, M. F. L. de. Análise comparativa de dados de precipitação gerados pelo “Climate Prediction Center – CPC” versus dados observados para o Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 10, n. 4, p. 1-19, 2017.

CHEN, D. et al. 2021. Framing, Context, and Methods. 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. et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p. 147-286. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.003>

CHRISTOPHERSON, R. W.; BIRKELAND, G. H. 2017. *Geosystems – An Introduction to Physical Geography*, 9ª ed., Pearson.

COELHO, C. A. S. et al. The 2014 southeast Brazil austral summer drought: regional scale mechanisms and teleconnections. **Climate Dynamics**, v. 46, p. 3737-3752, 2016.

Copernicus Climate Change Service (2022): Climate extreme indices and heat stress indicators derived from CMIP6 global climate projections. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). DOI: 10.24381/cds.776e08bd (Acesso em: 01/08/2024)

CORREA-MACANA, E.; COMIM, F. Mudança climática e desenvolvimento humano: uma análise baseada na Abordagem das Capacitações de Amartya Sen. **Economía, sociedad y territorio**, v. 13, n. 43, p. 577-618, 2013.

CPTEC/INPE & INMET. Nota Técnica conjunta CPTEC/INPE E INMET – Condições de déficit de chuva na Amazônia, 2023. Disponível em:

DALAGNOL, R. et al. Extreme rainfall and its impacts in the Brazilian Minas Gerais state in January 2020: Can we blame climate change?. **Climate Resilience and Sustainability**, v. 1, n. 1, p. e15, 2022.

DÖSCHER, R. et al. The EC-earth3 Earth system model for the climate model intercomparison project 6. **Geoscientific Model Development Discussions**, v. 2021, p. 1-90, 2021.

EYRING, V. et al. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. **Geoscientific Model Development**, v. 9, n. 5, p. 1937-1958, 2016.

FERREIRA, G. W. S.; REBOITA, M. S. A new look into the South America precipitation regimes: observation and forecast. *Atmosphere*, v. 13, n. 6, p. 873, 2022.

FIRPO, M. Â. F. et al. Assessment of CMIP6 models' performance in simulating present-day climate in Brazil. *Frontiers in Climate*, v. 4, p. 948499, 2022.

GIORGI, F.; RAFFAELE, F.; COPPOLA, E. The response of precipitation characteristics to global warming from climate projections. **Earth System Dynamics**, v. 10, n. 1, p. 73-89, 2019.

GLOOR, M. et al. Recent Amazon climate as background for possible ongoing and future changes of Amazon humid forests. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 29, n. 9, p. 1384-1399, 2015.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Produção Agrícola, 2022. Disponível em:

INPE - INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC). *Painel El Niño: Boletim Mensal*. nº 02, 2023.

Disponível em: https://dataserver.cptec.inpe.br/dataserver_diptc/web/Painel-Elnino/2023-2024/painel_el_nino_boletim_mensal_no_02.pdf.

<https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/>

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. Special Report: Global Warming of 1.5°C – Glossary, 2018. Disponível em:

<https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/glossary/>

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. Technical summary, 2021.

Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/technical-summary/>

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. Sixth Assessment Report – AR6, 2022. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>

- KAYANO, M. T. et al. El Niño e La Niña dos últimos 30 anos: diferentes tipos. **Revista Climanalise**, v. 7, 2016.
- KELLEY, M. et al. GISS-E2. 1: Configurations and climatology. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, v. 12, n. 8, p. 1-38, 2020.
- KENDALL, M.G. 1975. Rank correlation methods. 4ed, Charles Griffin, London.
- MANN, H. B. 1945. Nonparametric tests against trend. *Econometrica* 13:245–259.
- LI, J. et al. Coupled SSPs-RCPs scenarios to project the future dynamic variations of water-soil-carbon-biodiversity services in Central Asia. *Ecological Indicators*, v. 129, p. 107936, 2021.
- MARRAFON, V. H.; REBOITA, M. S. Características da precipitação na América do Sul reveladas através de índices climáticos. **Revista brasileira de climatologia**, v. 26, 2020.
- MCTI – Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. 2016. Modelagem Climática e Vulnerabilidades Setoriais às Mudanças Climáticas no Brasil. Disponível em: https://antigo.mctic.gov.br/mctic/export/sites/institucional/ciencia/SEPED/clima/publicacao/Comunicacoes_Nacionais/MCTI-LivroModelagemClimatica-edicao-eletronica-31mai2016_baixa_resolucao.pdf.
- NASA – National Aeronautics and Space Administration. NASA September 2023 Temperature Data Shows Continued Record Warming, 2023. Disponível em: <https://www.nasa.gov/image-article/nasa-september-2023-temperature-data-shows-continued-record-warming/>.
- NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of hydrology*, v. 10, n. 3, p. 282-290, 1970.
- 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.
- OLIVEIRA, D. M. 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**, v. 16, n. 01, p. 116-133, 2023.
- REBOITA, M. S. et al. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista brasileira de meteorologia**, v. 25, p. 185-204, 2010.
- ROCHA, R. P. et al. Análise do evento extremo de precipitação ocorrido no Rio Grande do Sul entre abril e maio de 2024. **Journal Health NPEPS**, v. 9, n. 1, 2024.

SEN, P. K.. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. Journal of the American statistical association, v. 63, n. 324, p. 1379-1389, 1968.

TORRES, F. L. R. et al. Validação de diferentes bases de dados de precipitação nas bacias hidrográficas do Sapucaí e São Francisco. **Revista brasileira de climatologia**, v. 27, p. 1-37. 2020.

WMO - World Meteorological Organization. The Atlas of mortality and economic losses from weather, climate and water extremes (1970–2019). n. 1267, 89 p. Disponível em: https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivoid=documentos/10221.1/83722/1/1267_Atlas_of_Mortality_en-final_-_26.07.2021.pdf.