



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21d/2023/11.27.14.14-TDI

**AVALIAÇÃO DE EXTREMOS CLIMÁTICOS NA
AMÉRICA DO SUL PARA VÁRIOS NÍVEIS DE
AQUECIMENTO GLOBAL GERADOS PELOS
MODELOS DO HELIX: QUANTIFICAÇÃO DE
INCERTEZAS**

Carolina Daniel Gouveia

Tese de Doutorado do Curso de
Pós-Graduação em Meteorologia,
orientada pelo Dr. José Antonio
Marengo Orsini, aprovada em 17 de
novembro de 2023.

URL do documento original:

<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/4A9TNBP>

INPE
São José dos Campos
2023

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Coordenação de Ensino, Pesquisa e Extensão (COEPE)
Divisão de Biblioteca (DIBIB)
CEP 12.227-010
São José dos Campos - SP - Brasil
Tel.:(012) 3208-6923/7348
E-mail: pubtc@inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE - CEPPII (PORTARIA Nº 176/2018/SEI-INPE):

Presidente:

Dra. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Coordenação-Geral de Ciências da Terra (CGCT)

Membros:

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação (CPG)
Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia, Tecnologia e Ciência Espaciais (CGCE)
Dr. Rafael Duarte Coelho dos Santos - Coordenação-Geral de Infraestrutura e Pesquisas Aplicadas (CGIP)
Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon
Clayton Martins Pereira - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Ivone Martins - Divisão de Biblioteca (DIBIB)
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21d/2023/11.27.14.14-TDI

**AVALIAÇÃO DE EXTREMOS CLIMÁTICOS NA
AMÉRICA DO SUL PARA VÁRIOS NÍVEIS DE
AQUECIMENTO GLOBAL GERADOS PELOS
MODELOS DO HELIX: QUANTIFICAÇÃO DE
INCERTEZAS**

Carolina Daniel Gouveia

Tese de Doutorado do Curso de
Pós-Graduação em Meteorologia,
orientada pelo Dr. José Antonio
Marengo Orsini, aprovada em 17 de
novembro de 2023.

URL do documento original:

<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/4A9TNBP>

INPE
São José dos Campos
2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Gouveia, Carolina Daniel.

G745a Avaliação de extremos climáticos na América do Sul para vários níveis de aquecimento global gerados pelos modelos do HELIX: Quantificação de incertezas / Carolina Daniel Gouveia. – São José dos Campos : INPE, 2023.

xxi + 135 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21d/2023/11.27.14.14-TDI)

Tese (Doutorado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2023.

Orientador : Dr. José Antonio Marengo Orsini.

1. Mudanças climáticas. 2. Projeções. 3. Incertezas. 4. Níveis de aquecimento específico. I. Título.

CDU 551.58



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÃO



INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

**DEFESA FINAL DE TESE CAROLINA DANIEL GOUVEIA
REG. 143340/2018 , BANCA Nº 271/2023**

No dia 17 de novembro de 2023, remotamente, o(a) aluno(a) mencionado(a) acima defendeu seu trabalho final (apresentação oral seguida de arguição) perante uma Banca Examinadora, cujos membros estão listados abaixo. O(A) aluno(a) foi APROVADO(A) pela Banca Examinadora, por unanimidade, em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de Doutora em Meteorologia, com a exigência de que o trabalho final a ser publicado deverá incorporar as correções sugeridas pela Banca Examinadora, com revisão pelo(s) orientador(es).

Título: "" Avaliação de Extremos Climáticos na América do Sul para vários níveis de aquecimento global gerados pelos modelos do HELIX: Quantificação de incertezas "".

Membros da banca:

Dra. Chou Sin Chan – Presidente – INPE

Dr. Gilberto Fernando Fisch - Membro Interno - INPE

Dr. José Antonio Marengo Orsini – Orientador – CEMADEN

Dra. Sâmia Regina Garcia Calheiros – Membro Externo – UNIFEI

Dr. Tércio Ambrizzi – Membro Externo – USP



Documento assinado eletronicamente por **Sâmia Regina garcia calheiros (E), Usuário Externo**, em 04/12/2023, às 08:09 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **José Antônio Marengo Orsini, Coordenador-Geral de Pesquisa e Desenvolvimento**, em 04/12/2023, às 09:15 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **gilberto fernando fisch (E), Usuário Externo**, em 04/12/2023, às 09:47 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Tercio ambrizzi (E), Usuário Externo**, em 04/12/2023, às 10:58 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Chou Sin Chan, Pesquisadora**, em 04/12/2023, às 16:35 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.mcti.gov.br/verifica.html>, informando o código verificador **11533460** e o código CRC **0FAFB188**.

Referência: Processo nº 01340.009722/2023-36

SEI nº 11533460

AGRADECIMENTOS

A meu orientador, professor Dr. José Antônio Marengo Orsini, por transmitir conhecimentos pertinentes e por ter sido paciente e compreensivo durante todo o tempo.

A minha mãe Ambrozina R. Daniel Gouveia e ao meu pai Ailton Gouveia, por todo amor e dedicação, por nunca desistirem de mim e da minha educação, e por todas as orações sobre a minha vida.

A meu esposo Hallan, por ter me incentivado o tempo todo, acreditado em mim quando eu mesma não conseguia mais, dividido a maternidade e as inúmeras dificuldades as quais passei e, sobretudo, pelo amor que sempre teve conosco. E a meu filho Théo, que mudou o sentido da minha vida e é a razão de continuarmos lutando. A mamãe ama cada detalhe seu, sua risada e suas sapequices.

A meus amigos Vanessa Siqueira, Ana Caroline Penna, Cássia Dias, Tatiana Amaro, Thiago Biscaro, Bruno Guimarães, pelas inúmeras ajudas, pelos dias de estudos e conversas, pelos incentivos e risadas.

Aos professores do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), principalmente à Dra. Simone Sievert por todo conhecimento repassado e apoio a minha maternidade.

Aos professores da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), que transmitiram conhecimentos e contribuíram para minha formação, em especial ao Dr. Roger Rodrigues Torres, que me orientou durante o mestrado, me incentivou a não desistir naquele momento e me auxiliou também durante o doutorado.

Aos membros da banca examinadora Dra. Chou Sin Chan, Dr. Gilberto Fisch, Dra. Sâmia Regina Garcia e Dr. Tércio Ambrizzi, pela participação e pelas sugestões para a composição da versão final da tese.

Aos funcionários e colegas de ambas as instituições de ensino, que trabalharam com afinco, seguiram a caminhada comigo e dividiram inúmeros desafios.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo subsídio financeiro durante o doutorado.

Sobretudo a Deus, por sempre me proteger e mostrar que o tempo dEle é perfeito e nunca demora, que cada detalhe tem um propósito e que tudo faz sentido, mesmo que não agora.

RESUMO

As mudanças no clima são evidentes e as projeções indicam aumento nos valores médios e nos extremos climáticos durante o século XXI. Regiões como a América do Sul (AS) serão as mais afetadas pelas mudanças, principalmente relacionadas aos extremos, uma vez que são marginalizadas e desestruturadas para suportar essas mudanças. As projeções provenientes de modelos, por mais que possuam grades refinadas e boa representação dos processos que compõem o Sistema Terrestre, possuem incertezas associadas, fazendo-se necessário conhecê-las. Assim, este trabalho tem como objetivo analisar as projeções de extremos climáticos dos modelos pertencentes ao *High-End cLimate Impacts and eXtremes* (HELIX) para a América do Sul nos níveis de aquecimento específico (SWLs) de 1,5 °C, 2 °C e 4 °C, quantificando as incertezas e impactos associados. A avaliação dos modelos mostra que o ensemble EC-EARTH3-HR superestima dias secos consecutivos (CDD) na região central do Brasil e mostra vieses positivos sobre os Andes para dias de precipitação intensa acima de 10 mm (R10mm), dias muito úmidos (R95p) e máximo de precipitação em 5 dias (Rx5Day); enquanto as maiores subestimativas estão sobre a região equatorial para os extremos de precipitação (exceto CDD). Para o ensemble HadGEM3, as subestimativas também estão sobre a faixa equatorial e Amazônia (AMZ) para os mesmos índices, e sobre o semiárido nordestino para CDD; já as superestimativas de R95p e Rx5Day são observadas sobre o Sul/Sudeste (S/SEB) e países adjacentes. Em relação aos índices de temperatura, as reanálises do ERA-5 e do MERRA-2 são melhor representadas pelo EC-EARTH3-HR em todo o território (exceto AMZ), sendo os maiores vieses para HadGEM3. A habilidade dos modelos em simular as observações e reanálises foi obtida através do Diagrama de Taylor e mostra maiores acurácias das rodadas do EC-EARTH3-HR em representar todos os índices, exceto CDD e noites muito frias (TN10p). Os índices de temperatura têm os menores vieses (não-significativos), apresentando desempenhos mais satisfatórios em simular o presente quando comparados aos índices de precipitação (vieses significativos). Em relação às projeções para o século XXI, os resultados mostram mudanças mais intensas e abrangentes para HadGEM3 em comparação ao EC-EARTH3-HR. Para extremos de precipitação, as projeções evidenciam escassez de chuvas no Nordeste (NEB) e leste da AMZ, aumento de CDD no central do Brasil e Andes, e elevação das chuvas sobre o oeste da AMZ, Sul do Brasil e norte da Argentina. Porém, tais mudanças são não-significativas e abrangem quase a totalidade da área nos 3 SWLs. Já para os extremos de temperatura, as projeções evidenciam aumento dos extremos quentes e diminuição dos extremos frios, em particular sobre a região AMZ. Tais mudanças sofrerão intensificação e expansão na direção sul da AS com o aumento de SWL, sendo significativamente robustas para todos os índices (exceto duração de ondas de calor - WSDI) quando aquecido 4 °C. Adicionalmente, as incertezas apresentaram maior variabilidade interna de CDD sobre o Sudeste, Centro-Oeste e litoral norte do NEB, e no S/SEB e Centro-Oeste para índices úmidos; enquanto a variabilidade dos modelos aumenta com o nível de aquecimento, se tornando dominante no total de incertezas em SWL 4.0 (90% do total). Para os extremos de temperatura, ambas as variabilidades são mais pronunciadas na região tropical e menos sobre a Argentina, sendo as incertezas dos modelos também predominantes no total, porém essa variabilidade diminui com SWL (exceto para dias muito quentes - TX90p - e WSDI). Por fim, a relação Sinal-Ruído indica alta confiabilidade das projeções de dias de precipitação intensa acima de 30 mm (R30mm) para grande parte da AS, enquanto há alta confiabilidade de diminuição de TN10p e dias muito frios (TX10p) sobre toda AS, e aumento de noites muito quentes (TN90p) para a faixa central e restante do continente, quando o incremento for de 4 °C, evidenciando assim a importância de limitar o aquecimento global em 2 °C.

Palavras-chave: Mudanças Climáticas. Projeções. Incertezas. Níveis de Aquecimento Específico.

EVALUATION OF CLIMATE EXTREMES IN SOUTH AMERICA FOR VARIOUS GLOBAL WARMING LEVELS GENERATED BY HELIX MODELS: QUANTIFICATION OF UNCERTAINTY

ABSTRACT

Climate changes are evident and projections indicate an increase in average values and climate extremes during the 21st century. Regions such as South America (SA) will be the most affected by changes, mainly related to extremes, since they are marginalized and unstructured to support these changes. Projections from models, even though they have refined grids and good representation of the processes that make up the Earth System, have associated uncertainties, making it necessary to know them. Therefore, this work aims to analyze the projections of climate extremes from models belonging to the High-End cLimate Impacts and eXtremes (HELIX) for South America at specific warming levels (SWLs) of 1.5 °C, 2 °C and 4 °C, quantifying the associated uncertainties and impacts. The model evaluation shows that the EC-EARTH3-HR ensemble overestimates consecutive dry days (CDD) in the central region of Brazil and shows positive biases over the Andes for days with intense precipitation above 10 mm (R10mm), very humid days (R95p) and maximum precipitation in 5 days (Rx5Day); while the largest underestimates are over the equatorial region for precipitation extremes (except CDD). For the HadGEM3 ensemble, the underestimates are also over the equatorial belt and the Amazon (AMZ) for the same indices, and over the northeastern semi-arid region for CDD; overestimates of R95p and Rx5Day are observed over the South/Southeast (S/SEB) and adjacent countries. Regarding temperature indices, the ERA-5 and MERRA-2 reanalyses are best represented by EC-EARTH3-HR across the entire territory (except AMZ), with the largest biases being for HadGEM3. The ability of the models to simulate observations and reanalysis was obtained through the Taylor Diagram and shows greater accuracies of the EC-EARTH3-HR runs in representing all indices, except CDD and very cold nights (TN10p). Temperature indices have the smallest biases (non-significant), presenting more satisfactory performances in simulating the present when compared to precipitation indices (significant biases). Regarding projections for the 21st century, the results show more intense and comprehensive changes for HadGEM3 compared to EC-EARTH3-HR. For precipitation extremes, projections show a lack of rainfall in the Northeast (NEB) and east of the AMZ, an increase in CDD in central Brazil and the Andes, and an increase in rainfall over the west of the AMZ, southern Brazil and northern Argentina. However, such changes are non-significant and cover almost the entire area in the 3 SWLs. As for temperature extremes, projections show an increase in hot extremes and a decrease in cold extremes, particularly over the AMZ region. Such changes will intensify and expand towards the south of SA with the increase in SWL, being significantly robust for all indices (except heat wave duration - WSDI) when heated by 4 °C. Additionally, the uncertainties presented greater internal variability of CDD over the Southeast, Central-West and northern coast of the NEB, and in the S/SEB and Central-West for humid indices; while the variability of the models increases with the level of warming, becoming dominant in the total uncertainties in SWL 4.0 (90% of the total). For temperature extremes, both variabilities are more pronounced in the tropical region and less over Argentina, with model uncertainties also predominant in total, but this variability decreases with SWL (except for very hot days - TX90p - and WSDI). Finally, the Signal-to-Noise ratio indicates high reliability of projections of days with intense precipitation above 30 mm (R30mm) for a large part of SA, while there is high reliability of a decrease in TN10p and very cold days (TX10p) over all of SA, and an increase in very hot nights (TN90p) for the central region and the rest of the continent, when the increase is 4 °C, thus highlighting the importance of limiting global warming to 2 °C.

Keywords: Climate Change. Projections. Uncertainties. Specific Warming Levels.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 2.1** - Variação da temperatura média global observada mensalmente (linha cinza) e estimativa do aquecimento global antropogênico (linha sólida laranja com intervalo de variação). Após 2017, a região cinza corresponde ao intervalo de aquecimento para um cenário hipotético de emissões de CO₂ líquida nula até 2055, a região azul mostra a resposta às reduções mais rápidas de emissões do gás (resultando em alta probabilidade de limitar o aquecimento em 1,5 °C) e a região roxa corresponde à não redução de CO₂ (resultando em baixa probabilidade de limitar o aquecimento em 1,5 °C).8
- Figura 2.2** - Mudança nas projeções de extremos climáticos de temperatura (número de dias quentes - NHD, dias muito quentes - TXx, noites muito frias - TNn) e precipitação (precipitação extrema - Rx5day) para o final do século XXI para os níveis de aquecimento de 1,5 °C (coluna esquerda), 2 °C (coluna central) e a diferença entre 2 °C e 1,5 °C (coluna direita).10
- Figura 3.1** - Domínio de estudo. As áreas delimitadas indicam as sub-regiões nas quais foram feitas análises mais detalhadas: Amazônia (AMZ - retângulo azul), Nordeste do Brasil (NEB - retângulo amarelo) e Sul e Sudeste do Brasil (S/SEB - retângulo vermelho). Os dados são referentes apenas à área continental, sendo desconsiderados os pontos sobre o oceano.23
- Figura 3.2** - Emissões de CO₂ (a), concentrações de CO₂ (b), forçante radiativa antropogênica (c) e temperatura média global (d) para os diferentes cenários SSPs. Áreas cinzas representam o range de cenários da base de dados do AR5 do IPCC, incluindo RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 e RCP8.5.28
- Figura 4.1** - Climatologia média anual observada (superior), simulada (central) e viés associado (inferior) dos índices extremos de precipitação, resultantes, respectivamente, dos dados do CHIRPS, da média dos modelos do EC-EARTH3-HR e da diferença entre ambos (simulado menos observado), referentes ao período de 1981 a 2010. As áreas hachuradas correspondem a vieses significativos estatisticamente. As unidades estão em *dias* para os índices CDD (a, f, k), R10mm (b, g, l) e R30mm (c, h, m), e em *mm* para os índices R95p (d, i, n) e Rx5Day (e, j, o).41
- Figura 4.2** - Climatologia média anual observada (superior), simulada (central) e viés associado (inferior) dos índices extremos de precipitação, resultantes, respectivamente, dos dados do CHIRPS, da média dos modelos do HadGEM3 e da diferença entre ambos (simulado menos observado), referentes ao período de 1981 a 2010. As áreas hachuradas correspondem a vieses significativos estatisticamente. As unidades estão em *dias* para os índices CDD (a, f, k), R10mm (b, g, l) e R30mm (c, h, m), e em *mm* para os índices R95p (d, i, n) e Rx5Day (e, j, o).42
- Figura 4.3** - Climatologia média anual observada (superior), simulada (central) e viés associado (inferior) dos índices extremos de precipitação, resultantes, respectivamente, dos dados do CHIRPS, da média dos modelos do HELIX e da diferença entre ambos (simulado menos observado), referentes ao período de 1981 a 2010. As áreas hachuradas correspondem a vieses significativos estatisticamente. As unidades estão em *dias* para os índices CDD (a, f, k), R10mm (b, g, l) e R30mm (c, h, m), e em *mm* para os índices R95p (d, i, n) e Rx5Day (e, j, o).43
- Figura 4.4** - Climatologia média anual observada (superior), simulada (central) e viés associado (inferior) dos índices extremos de temperatura, resultantes, respectivamente, dos dados do ERA-5, da média dos modelos do EC-EARTH3-HR e da diferença entre ambos (simulado menos observado), referentes ao período de 1981 a 2010. As áreas hachuradas correspondem a vieses significativos estatisticamente. As unidades estão em % para os índices TN10p (a, f, k), TN90p (b, g, l), TX10p (c, h, m) e TX90p (d, i, n), e em *dias* para o índice WSDI (e, j, o).45

Figura 4.5 - Climatologia média anual observada (superior), simulada (central) e viés associado (inferior) dos índices extremos de temperatura, resultantes, respectivamente, dos dados do ERA-5, da média dos modelos do HadGEM3 e da diferença entre ambos (simulado menos observado), referentes ao período de 1981 a 2010. As áreas hachuradas correspondem a vieses significativos estatisticamente. As unidades estão em % para os índices TN10p (<i>a, f, k</i>), TN90p (<i>b, g, l</i>), TX10p (<i>c, h, m</i>) e TX90p (<i>d, i, n</i>), e em <i>dias</i> para o índice WSDI (<i>e, j, o</i>).....	46
Figura 4.6 - Climatologia média anual observada (superior), simulada (central) e viés associado (inferior) dos índices extremos de temperatura, resultantes, respectivamente, dos dados do ERA-5, da média dos modelos do HELIX e da diferença entre ambos (simulado menos observado), referentes ao período de 1981 a 2010. As áreas hachuradas correspondem a vieses significativos estatisticamente. As unidades estão em % para os índices TN10p (<i>a, f, k</i>), TN90p (<i>b, g, l</i>), TX10p (<i>c, h, m</i>) e TX90p (<i>d, i, n</i>), e em <i>dias</i> para o índice WSDI (<i>e, j, o</i>).....	47
Figura 4.7 - Climatologia média anual observada (superior), simulada (central) e viés associado (inferior) dos índices extremos de temperatura, resultantes, respectivamente, dos dados do MERRA-2, da média dos modelos do EC-EARTH3-HR e da diferença entre ambos (simulado menos observado), referentes ao período de 1981 a 2010. As áreas hachuradas correspondem a vieses significativos estatisticamente. As unidades estão em % para os índices TN10p (<i>a, f, k</i>), TN90p (<i>b, g, l</i>), TX10p (<i>c, h, m</i>) e TX90p (<i>d, i, n</i>), e em <i>dias</i> para o índice WSDI (<i>e, j, o</i>).....	48
Figura 4.8 - Climatologia média anual observada (superior), simulada (central) e viés associado (inferior) dos índices extremos de temperatura, resultantes, respectivamente, dos dados do MERRA-2, da média dos modelos do HadGEM3 e da diferença entre ambos (simulado menos observado), referentes ao período de 1981 a 2010. As áreas hachuradas correspondem a vieses significativos estatisticamente. As unidades estão em % para os índices TN10p (<i>a, f, k</i>), TN90p (<i>b, g, l</i>), TX10p (<i>c, h, m</i>) e TX90p (<i>d, i, n</i>), e em <i>dias</i> para o índice WSDI (<i>e, j, o</i>).....	49
Figura 4.9 - Climatologia média anual observada (superior), simulada (central) e viés associado (inferior) dos índices extremos de temperatura, resultantes, respectivamente, dos dados do MERRA-2, da média dos modelos do HELIX e da diferença entre ambos (simulado menos observado), referentes ao período de 1981 a 2010. As áreas hachuradas correspondem a vieses significativos estatisticamente. As unidades estão em % para os índices TN10p (<i>a, f e k</i>), TN90p (<i>b, g e l</i>), TX10p (<i>c, h e m</i>) e TX90p (<i>d, i e n</i>), e em <i>dias</i> para o índice WSDI (<i>e, j e o</i>).	50
Figura 4.10 – Diagramas de Taylor para as simulações dos índices de precipitação CDD (<i>a, b, c</i>), R10mm (<i>d, e, f</i>), R30mm (<i>g, h, i</i>), R95p (<i>j, k, l</i>) e Rx5Day (<i>m, n, o</i>) nas sub-regiões AMZ (esquerda), NEB (central) e S/SEB (direita) para todos os MCGs do HELIX. Em azul são representadas as 7 rodadas do EC-EARTH3-HR e, em vermelho, as 6 rodadas do HadGEM3. O diagrama mostra a correlação de Pearson (linhas pretas), erro quadrático médio (linhas circulares verdes) e desvio padrão (linhas circulares azuis). O quadrado verde na abscissa representa as observações CHIRPS e o período utilizado das séries de dados foi 1981-2010.	54
Figura 4.11 – Diagramas de Taylor para as simulações dos índices de temperatura TN10p (<i>a, b, c</i>), TN90p (<i>d, e, f</i>), TX10p (<i>g, h, i</i>), TX90p (<i>j, k, l</i>) e WSDI (<i>m, n, o</i>) nas sub-regiões AMZ (esquerda), NEB (central) e S/SEB (direita) para todos os MCGs do HELIX. Em azul são representadas as 7 rodadas do EC-EARTH3-HR e, em vermelho, as 6 rodadas do HadGEM3. O diagrama mostra a correlação de Pearson (linhas pretas), erro quadrático médio (linhas circulares verdes) e desvio padrão (linhas circulares azuis). O quadrado verde na abscissa representa as reanálises ERA-5 e o período utilizado das séries de dados foi 1981-2010.	55

- Figura 4.12** – Diagramas de Taylor para as simulações dos índices de temperatura TN10p (*a, b, c*), TN90p (*d, e, f*), TX10p (*g, h, i*), TX90p (*j, k, l*) e WSDI (*m, n, o*) nas sub-regiões AMZ (esquerda), NEB (central) e S/SEB (direita) para todos os MCGs do HELIX. Em azul são representadas as 7 rodadas do EC-EARTH3-HR e, em vermelho, as 6 rodadas do HadGEM3. O diagrama mostra a correlação de Pearson (linhas pretas), erro quadrático médio (linhas circulares verdes) e desvio padrão (linhas circulares azuis). O quadrado verde na abscissa representa as reanálises MERRA-2 e o período utilizado das séries de dados foi 1981-2010.56
- Figura 5.1** – Mudanças anuais dos índices extremos de precipitação CDD (*a, f, k*), R10mm (*b, g, l*), R30mm (*c, h, m*), R95p (*d, i, n*), Rx5Day (*e, j, o*) projetadas para SWL 1.5 (superior), SWL 2.0 (central) e SWL 4.0 (inferior), provenientes do ensemble das rodadas do EC-EARTH3-HR. As mudanças são definidas como a diferença entre as projeções e o período de referência (1981-2010), sendo também classificadas em não-significativas (\\), robustas (///) e incertas (omitida).60
- Figura 5.2** – Mudanças anuais dos índices extremos de precipitação CDD (*a, f, k*), R10mm (*b, g, l*), R30mm (*c, h, m*), R95p (*d, i, n*), Rx5Day (*e, j, o*) projetadas para SWL 1.5 (superior), SWL 2.0 (central) e SWL 4.0 (inferior), provenientes do ensemble das rodadas do HadGEM3. As mudanças são definidas como a diferença entre as projeções e o período de referência (1981-2010), sendo também classificadas em não-significativas (\\), robustas (///) e incertas (omitida).61
- Figura 5.3** – Mudanças anuais dos índices extremos de precipitação CDD (*a, f, k*), R10mm (*b, g, l*), R30mm (*c, h, m*), R95p (*d, i, n*), Rx5Day (*e, j, o*) projetadas para SWL 1.5 (superior), SWL 2.0 (central) e SWL 4.0 (inferior), provenientes do ensemble das rodadas do HELIX. As mudanças são definidas como a diferença entre as projeções e o período de referência (1981-2010), sendo também classificadas em não-significativas (\\), robustas (///) e incertas (omitida).62
- Figura 5.4** – Mudanças anuais dos índices extremos de temperatura TN10p (*a, f, k*), TN90p (*b, g, l*), TX10p (*c, h, m*), TX90p (*d, i, n*), WSDI (*e, j, o*) projetadas para SWL 1.5 (superior), SWL 2.0 (central) e SWL 4.0 (inferior), provenientes do ensemble das rodadas do EC-EARTH3-HR. As mudanças são definidas como a diferença entre as projeções e o período de referência (1981-2010), sendo também classificadas em não-significativas (\\), robustas (///) e incertas (omitida).64
- Figura 5.5** – Mudanças anuais dos índices extremos de temperatura TN10p (*a, f, k*), TN90p (*b, g, l*), TX10p (*c, h, m*), TX90p (*d, i, n*), WSDI (*e, j, o*) projetadas para SWL 1.5 (superior), SWL 2.0 (central) e SWL 4.0 (inferior), provenientes do ensemble das rodadas do HadGEM3. As mudanças são definidas como a diferença entre as projeções e o período de referência (1981-2010), sendo também classificadas em não-significativas (\\), robustas (///) e incertas (omitida).65
- Figura 5.6** – Mudanças anuais dos índices extremos de temperatura TN10p (*a, f, k*), TN90p (*b, g, l*), TX10p (*c, h, m*), TX90p (*d, i, n*), WSDI (*e, j, o*) projetadas para SWL 1.5 (superior), SWL 2.0 (central) e SWL 4.0 (inferior), provenientes do ensemble das rodadas do HELIX. As mudanças são definidas como a diferença entre as projeções e o período de referência (1981-2010), sendo também classificadas em não-significativas (\\), robustas (///) e incertas (omitida).66
- Figura 5.7** – Fração de área (%) com mudança robusta (barras coloridas) ou não-significativa (barras cinzas) comparada ao período de referência 1981-2010 para os índices de precipitação e temperatura, quando diferentes SWLs. As colunas representam, respectivamente, os ensembles EC-EARTH3-HR, HadGEM3 e HELIX para a AS (linha 1) e sub-regiões AMZ (linha 2), NEB (linha 3) e S/SEB (linha 4). Tons frios mostram mudanças robustas negativas e tons quentes se referem às mudanças robustas positivas relativas a um aquecimento de 1.5 °C, 2 °C e 4 °C.68

- Figura 5.8** – Função Densidade de Probabilidade (PDF) da fração de área com determinada mudança, comparada ao período de referência 1981-2010, para os índices de precipitação CDD (*a, b, c*), R10mm (*d, e, f*), R30mm (*g, h, i*), R95p (*j, k, l*) e Rx5Day (*m, n, o*). Linhas azuis referem-se ao SWL 1.5, linhas pretas ao SWL 2.0 e linhas vermelhas ao SWL 4.0, para as sub-regiões AMZ (coluna esquerda), NEB (coluna central) e S/SEB (coluna direita). Os resultados destacam a mediana (linha grossa) e o intervalo interquartil (linhas finas) das PDFs dos modelos individuais e as unidades estão em desvios-padrão da série temporal de referência 1981-2010 para cada índice extremo.....70
- Figura 5.9** – Função Densidade de Probabilidade (PDF) da fração de área com determinada mudança, comparada ao período de referência 1981-2010, para os índices de temperatura TN10p (*a, b, c*), TN90p (*d, e, f*), TX10p (*g, h, i*), TX90p (*j, k, l*) e WSDI (*m, n, o*). Linhas azuis referem-se ao SWL 1.5, linhas pretas ao SWL 2.0 e linhas vermelhas ao SWL 4.0, para as sub-regiões AMZ (coluna esquerda), NEB (coluna central) e S/SEB (coluna direita). Os resultados destacam a mediana (linha grossa) e o intervalo interquartil (linhas finas) das PDFs dos modelos individuais e as unidades estão em desvios-padrão da série temporal de referência 1981-2010 para cada índice extremo.....71
- Figura 6.1** – Variabilidade interna (linha 1) e variabilidade dos modelos nas projeções sob acréscimo de temperatura de 1,5 °C (linha 2), 2 °C (linha 3) e 4 °C (linha 4), referentes aos índices de precipitação CDD (*a, f, k, p*), R10mm (*b, g, l, q*), R30mm (*c, h, m, r*), R95p (*d, i, n, s*) e Rx5Day (*e, j, o, t*). A área sem preenchimento no extremo sul da AS se deve aos dados observados do CHIRPS estarem disponíveis apenas até 50°S.....74
- Figura 6.2** – Variabilidade interna (linha 1) e variabilidade dos modelos nas projeções sob acréscimo de temperatura de 1,5 °C (linha 2), 2 °C (linha 3) e 4 °C (linha 4), referentes aos índices de temperatura TN10p (*a, f, k, p*), TN90p (*b, g, l, q*), TX10p (*c, h, m, r*), TX90p (*d, i, n, s*) e WSDI (*e, j, o, t*).76
- Figura 6.3** – Peso relativo da variabilidade dos modelos no total de incertezas para os índices de precipitação CDD (*a, f, k*), R10mm (*b, g, l*), R30mm (*c, h, m*), R95p (*d, i, n*) e Rx5Day (*e, j, o*) havendo acréscimo de temperatura de 1,5 °C (linha superior), 2 °C (linha central) e 4 °C (linha inferior). A área sem preenchimento no extremo sul da AS se deve aos dados observados do CHIRPS estarem disponíveis apenas até 50°S.78
- Figura 6.4** – Peso relativo da variabilidade dos modelos no total de incertezas para os índices de temperatura TN10p (*a, f, k*), TN90p (*b, g, l*), TX10p (*c, h, m*), TX90p (*d, i, n*) e WSDI (*e, j, o*) havendo acréscimo de temperatura de 1,5 °C (linha superior), 2 °C (linha central) e 4 °C (linha inferior).....79
- Figura 6.5** – Relação Sinal-Ruído (S/R) para os índices de precipitação CDD (*a, f, k*), R10mm (*b, g, l*), R30mm (*c, h, m*), R95p (*d, i, n*) e Rx5Day (*e, j, o*). As linhas (de cima a baixo) indicam os níveis de aquecimento de 1,5 °C, 2 °C e 4 °C. Valores negativos de S/R indicam que as projeções da variável climática deverão diminuir.80
- Figura 6.6** – Relação Sinal-Ruído (S/R) para os índices de temperatura TN10p (*a, f, k*), TN90p (*b, g, l*), TX10p (*c, h, m*), TX90p (*d, i, n*) e WSDI (*e, j, o*). As linhas (de cima a baixo) indicam os níveis de aquecimento de 1,5 °C, 2 °C e 4 °C. Valores negativos de S/R indicam que as projeções da variável climática deverão diminuir.81
- Figura A.1** - Climatologia média anual de CDD (esquerda) e viés associado (direita), simulada pelos MCGs do HELIX para o período 1981-2010. A climatologia observada pelo CHIRPS encontra-se no canto inferior esquerdo. As áreas hachuradas correspondem a vieses significativos estatisticamente. As unidades estão em dias.103
- Figura A.2** - Climatologia média anual de R10mm (esquerda) e viés associado (direita), simulada pelos MCGs do HELIX para o período 1981-2010. A climatologia observada pelo CHIRPS encontra-se no canto inferior esquerdo. As áreas hachuradas correspondem a vieses significativos estatisticamente. As unidades estão em dias.104

Figura A.3 - Climatologia média anual de R30mm (esquerda) e viés associado (direita), simulada pelos MCGs do HELIX para o período 1981-2010. A climatologia observada pelo CHIRPS encontra-se no canto inferior esquerdo. As áreas hachuradas correspondem a vieses significativos estatisticamente. As unidades estão em dias.	105
Figura A.4 - Climatologia média anual de R95p (esquerda) e viés associado (direita), simulada pelos MCGs do HELIX para o período 1981-2010. A climatologia observada pelo CHIRPS encontra-se no canto inferior esquerdo. As áreas hachuradas correspondem a vieses significativos estatisticamente. As unidades estão em mm.	106
Figura A.5 - Climatologia média anual de Rx5Day (esquerda) e viés associado (direita), simulada pelos MCGs do HELIX para o período 1981-2010. A climatologia observada pelo CHIRPS encontra-se no canto inferior esquerdo. As áreas hachuradas correspondem a vieses significativos estatisticamente. As unidades estão em mm.	107
Figura A.6 - Climatologia média anual de TN10p (esquerda) e viés associado (direita), simulada pelos MCGs do HELIX para o período 1981-2010. A climatologia observada pelo ERA-5 encontra-se no canto inferior esquerdo. As áreas hachuradas correspondem a vieses significativos estatisticamente. As unidades estão em %.	108
Figura A.7 - Climatologia média anual de TN10p (esquerda) e viés associado (direita), simulada pelos MCGs do HELIX para o período 1981-2010. A climatologia observada pelo MERRA-2 encontra-se no canto inferior direito. As áreas hachuradas correspondem a vieses significativos estatisticamente. As unidades estão em %.	109
Figura A.8 - Climatologia média anual de TN90p (esquerda) e viés associado (direita), simulada pelos MCGs do HELIX para o período 1981-2010. A climatologia observada pelo ERA-5 encontra-se no canto inferior esquerdo. As áreas hachuradas correspondem a vieses significativos estatisticamente. As unidades estão em %.	110
Figura A.9 - Climatologia média anual de TN90p (esquerda) e viés associado (direita), simulada pelos MCGs do HELIX para o período 1981-2010. A climatologia observada pelo MERRA-2 encontra-se no canto inferior direito. As áreas hachuradas correspondem a vieses significativos estatisticamente. As unidades estão em %.	111
Figura A.10 - Climatologia média anual de TX10p (esquerda) e viés associado (direita), simulada pelos MCGs do HELIX para o período 1981-2010. A climatologia observada pelo ERA-5 encontra-se no canto inferior esquerdo. As áreas hachuradas correspondem a vieses significativos estatisticamente. As unidades estão em %.	112
Figura A.11 - Climatologia média anual de TX10p (esquerda) e viés associado (direita), simulada pelos MCGs do HELIX para o período 1981-2010. A climatologia observada pelo MERRA-2 encontra-se no canto inferior direito. As áreas hachuradas correspondem a vieses significativos estatisticamente. As unidades estão em %.	113
Figura A.12 - Climatologia média anual de TX90p (esquerda) e viés associado (direita), simulada pelos MCGs do HELIX para o período 1981-2010. A climatologia observada pelo ERA-5 encontra-se no canto inferior esquerdo. As áreas hachuradas correspondem a vieses significativos estatisticamente. As unidades estão em %.	114
Figura A.13 - Climatologia média anual de TX90p (esquerda) e viés associado (direita), simulada pelos MCGs do HELIX para o período 1981-2010. A climatologia observada pelo MERRA-2 encontra-se no canto inferior direito. As áreas hachuradas correspondem a vieses significativos estatisticamente. As unidades estão em %.	115
Figura A.14 - Climatologia média anual de WSDI (esquerda) e viés associado (direita), simulada pelos MCGs do HELIX para o período 1981-2010. A climatologia observada pelo ERA-5 encontra-se no canto inferior esquerdo. As áreas hachuradas correspondem a vieses significativos estatisticamente. As unidades estão em dias.	116
Figura A.15 - Climatologia média anual de WSDI (esquerda) e viés associado (direita), simulada pelos MCGs do HELIX para o período 1981-2010. A climatologia observada pelo	

MERRA-2 encontra-se no canto inferior direito. As áreas hachuradas correspondem a vieses significativos estatisticamente. As unidades estão em dias.	117
Figura B.1 - Anomalias Futuras de CDD (dias) e sua significância para SWL 1.5 (superior), SWL 2.0 (centro) e SWL 4.0 (inferior), referentes às rodadas individuais dos modelos do HELIX. As áreas hachuradas correspondem a vieses significativos estatisticamente.	119
Figura B.2 - Anomalias Futuras de R10mm (dias) e sua significância para SWL 1.5 (superior), SWL 2.0 (centro) e SWL 4.0 (inferior), referentes às rodadas individuais dos modelos do HELIX. As áreas hachuradas correspondem a vieses significativos estatisticamente.	120
Figura B.3 - Anomalias Futuras de R30mm (dias) e sua significância para SWL 1.5 (superior), SWL 2.0 (centro) e SWL 4.0 (inferior), referentes às rodadas individuais dos modelos do HELIX. As áreas hachuradas correspondem a vieses significativos estatisticamente.	121
Figura B.4 - Anomalias Futuras de R95p (mm) e sua significância para SWL 1.5 (superior), SWL 2.0 (centro) e SWL 4.0 (inferior), referentes às rodadas individuais dos modelos do HELIX. As áreas hachuradas correspondem a vieses significativos estatisticamente.	122
Figura B.5 - Anomalias Futuras de Rx5Day (mm) e sua significância para SWL 1.5 (superior), SWL 2.0 (centro) e SWL 4.0 (inferior), referentes às rodadas individuais dos modelos do HELIX. As áreas hachuradas correspondem a vieses significativos estatisticamente.	123
Figura B.6 - Anomalias Futuras de TN10p (%) e sua significância para SWL 1.5 (superior), SWL 2.0 (centro) e SWL 4.0 (inferior), referentes às rodadas individuais dos modelos do HELIX. As áreas hachuradas correspondem a vieses significativos estatisticamente.	124
Figura B.7 - Anomalias Futuras de TN90p (%) e sua significância para SWL 1.5 (superior), SWL 2.0 (centro) e SWL 4.0 (inferior), referentes às rodadas individuais dos modelos do HELIX. As áreas hachuradas correspondem a vieses significativos estatisticamente.	125
Figura B.8 - Anomalias Futuras de TX10p (%) e sua significância para SWL 1.5 (superior), SWL 2.0 (centro) e SWL 4.0 (inferior), referentes às rodadas individuais dos modelos do HELIX. As áreas hachuradas correspondem a vieses significativos estatisticamente.	126
Figura B.9 - Anomalias Futuras de TX90p (%) e sua significância para SWL 1.5 (superior), SWL 2.0 (centro) e SWL 4.0 (inferior), referentes às rodadas individuais dos modelos do HELIX. As áreas hachuradas correspondem a vieses significativos estatisticamente.	127
Figura B.10 - Anomalias Futuras de WSDI (dias) e sua significância para SWL 1.5 (superior), SWL 2.0 (centro) e SWL 4.0 (inferior), referentes às rodadas individuais dos modelos do HELIX. As áreas hachuradas correspondem a vieses significativos estatisticamente.	128

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Trabalhos utilizando projeções dos MCGAs do HELIX para diferentes regiões do mundo. Os sobrescritos ao nome dos autores corresponde ao SWL de 1,5 °C [1], 2 °C [2] e 4 °C [3].	17
Tabela 3.1 - MCGAs do HELIX, seus respectivos modelos forçantes os quais forneceram condições de fronteira de SST e SIC, período e ano em que a TMG atinge os diferentes SWLs. As projeções assinaladas com * não foram incluídas.	26
Tabela 3.2 - Índices extremos climáticos anuais de precipitação e temperatura.	31
Tabela C.1 - Fração de área das classes de mudanças futuras (robusta, incerta, não-significativa) para cada SWL (1.5 °C, 2 °C e 4 °C) e regiões (AS, AMZ, NEB, S/SEB), referentes aos índices de precipitação para o ensemble EC-EARTH3-HR.	130
Tabela C.2 - Fração de área das classes de mudanças futuras (robusta, incerta, não-significativa) para cada SWL (1.5 °C, 2 °C e 4 °C) e regiões (AS, AMZ, NEB, S/SEB), referentes aos índices de temperatura para o ensemble EC-EARTH3-HR.	131
Tabela C.3 - Fração de área das classes de mudanças futuras (robusta, incerta, não-significativa) para cada SWL (1.5 °C, 2 °C e 4 °C) e regiões (AS, AMZ, NEB, S/SEB), referentes aos índices de precipitação para o ensemble HadGEM3.	132
Tabela C.4 - Fração de área das classes de mudanças futuras (robusta, incerta, não-significativa) para cada SWL (1.5 °C, 2 °C e 4 °C) e regiões (AS, AMZ, NEB, S/SEB), referentes aos índices de temperatura para o ensemble HadGEM3.	133
Tabela C.5 - Fração de área das classes de mudanças futuras (robusta, incerta, não-significativa) para cada SWL (1.5 °C, 2 °C e 4 °C) e regiões (AS, AMZ, NEB, S/SEB), referentes aos índices de precipitação para o ensemble HELIX.	134
Tabela C.6 - Fração de área das classes de mudanças futuras (robusta, incerta, não-significativa) para cada SWL (1.5 °C, 2 °C e 4 °C) e regiões (AS, AMZ, NEB, S/SEB), referentes aos índices de temperatura para o ensemble HELIX.	135

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AI	<i>Aridity Index</i>
AMZ	Amazônia
AR5	<i>IPCC 5th Assessment Report</i>
AR6	<i>IPCC 6th Assessment Report</i>
AS	América do Sul
CDD	Dias secos consecutivos
CDS	<i>Climate Data Store</i>
CHIRPS	<i>Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station Data</i>
CH ₄	Metano
CMIP5	<i>Coupled Model Intercomparison Project Phase 5</i>
CMIP6	<i>Coupled Model Intercomparison Project Phase 6</i>
CO	Centro-Oeste do Brasil
CO ₂	Dióxido de carbono
CRU	<i>Climatic Research Unit</i>
DMS	Diferença mínima significativa
ECMWF	<i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i>
ENSO	<i>El Niño-Southern Oscillation</i>
EROS	<i>Earth Resources Observation and Science</i>
ETP	Evapotranspiração
GEEs	Gases do Efeito Estufa
HELIX	<i>High-End cLimate Impacts and eXtremes</i>
IAM	Integrated Assessment Models
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
MCGs	Modelos de Circulação Geral
MCGAs	Modelos Climáticos Globais Atmosféricos
MME	<i>Multi-models Ensemble</i>
MMQ	Método dos Mínimos Quadrados
MOHC	<i>UK Met Office Hadley Centre</i>
NCAR	<i>National Center for Atmospheric Research</i>
NCEP	<i>National Centers for Environmental Prediction</i>
NEB	Nordeste do Brasil

PCDMI	<i>Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison</i>
PDF	<i>Probability Distribution Function</i>
PDO	<i>Pacific Decadal Oscillation</i>
RCPs	<i>Representative Concentration Pathways</i>
REA	<i>Reliability Ensemble Averaging</i>
Rx5Day	Precipitação anual máxima em 5 dias consecutivos
R10mm	Dias de precipitação intensa acima de 10mm
R50mm	Dias de precipitação intensa acima de 50mm
R95p	Dias muito úmidos
SIC	<i>Sea Ice Concentration</i>
SMHI	<i>Swedish Meteorological and Hydrological Institute</i>
SRES	<i>Special Report on Emission Scenarios</i>
SR15	<i>Special Report about Global warming of 1.5°C</i>
SSPs	<i>Shared Socioeconomic Pathways</i>
SST	<i>Sea Surface Temperature</i>
S / SEB	Sul / Sudeste do Brasil
SWL	<i>Specific Warming Levels</i>
TMG	Temperatura média global à superfície
TN10p	Noites muito frias
TN90p	Noites muito quentes
TX10p	Dias muito frios
TX90p	Dias muito quentes
UEA	<i>University of East Anglia</i>
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
WSDI	Duração de ondas de calor

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos.....	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 Mudanças climáticas: observações e projeções médias.....	5
2.2 Projeções globais de extremos climáticos e sobre a América do Sul	8
2.3 Níveis de aquecimento e <i>tipping points</i>	12
2.4 Modelos de alta resolução: HELIX	15
2.5 Incertezas nas projeções climáticas	17
3 METODOLOGIA	22
3.1 Região de estudo.....	22
3.2 Dados.....	24
3.2.1 Simulações e projeções	24
3.2.2 Reanálises e observações	28
3.3 Métodos	30
3.3.1 Índices extremos	30
3.3.2 Interpolação e <i>ensemble</i> multimodelos	31
3.3.3 Avaliação dos modelos do HELIX	32
3.3.4 Projeções e mudanças da variável climática	34
3.3.5 Incertezas das projeções.....	35
4 AVALIAÇÃO DOS MODELOS	38
5 PROJEÇÕES E MUDANÇAS DA VARIÁVEL CLIMÁTICA	57
6 INCERTEZAS DAS PROJEÇÕES	72
7 CONCLUSÕES	83
APÊNDICE A - SIMULAÇÕES INDIVIDUAIS DOS MODELOS DO HELIX.....	102
APÊNDICE B - PROJEÇÕES INDIVIDUAIS DOS MODELOS DO HELIX	118
APÊNDICE C - TABELAS DE FRAÇÃO DE ÁREA DAS CLASSES DE MUDANÇAS	129

1 INTRODUÇÃO

Os eventos extremos apresentam comportamento fora dos níveis considerados normais, e quando são reincidentes por determinados períodos ou estações do ano, podem ser caracterizados como extremos climáticos. Segundo o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, 2012, 2018c, 2021), as projeções mostram que, no geral, esses eventos sofrerão aumento em magnitude, extensão e frequência durante o século XXI, podendo causar mudanças significativas sobre diversas regiões do mundo através de estiagens prolongadas, precipitações intensas, inundações, deslizamentos de terra, ondas de frio e calor (VALVERDE, MARENGO, 2014; NAUMANN et al., 2018; MOHAMMED et al. 2018; DOSIO et al., 2018; MARENGO et al., 2021), além de impactar em setores agropecuários, energéticos, no abastecimento de água e na saúde (BETTS et al, 2018; KOUTROULIS et al., 2018; MARENGO et al., 2021).

Tais alterações nas características médias e extremas do clima podem ser decorrentes da variabilidade natural, a qual inclui forçantes externas, como por exemplo, erupções vulcânicas, mudanças relativas aos movimentos de rotação e translação da Terra, ou internas à dinâmica terrestre, devido às interações entre as componentes do Sistema Climático (atmosfera, litosfera, hidrosfera, biosfera, criosfera), como o fenômeno El Niño (BJERKNES, 1969; MOSS et al., 2010). Contudo, evidências mostram que as atividades antropogênicas contribuíram para elevar a concentração de gases do efeito estufa (GEEs) e aerossóis na atmosfera a níveis históricos, causando um aquecimento adicional ao sistema além do processo natural do efeito estufa já existente (MEEHL et al., 2007; IPCC, 2014, 2021).

A América do Sul está entre as regiões mais vulneráveis às mudanças nos padrões climáticos, uma vez que elas afetarão fortemente países tropicais, com deficiências na saúde, na economia (subdesenvolvida ou em desenvolvimento) e na infraestrutura (IPCC, 2022). Juntamente com o desmatamento e mudanças na cobertura do solo, o aumento das temperaturas pode acarretar diminuição de precipitação, favorecendo estiagens e secas severas. Assim, áreas como o Nordeste brasileiro (NEB) e a Amazônia (AMZ) podem atingir seus limiares de estabilidade (*tipping points*) e mudarem permanentemente o clima local e a vegetação típica da região, tornando-se mais áridas e consolidando processos de savanização de partes da Amazônia (OYAMA, NOBRE,

2003; NOBRE, BORMA, 2009; LOVEJOY, NOBRE, 2018), principalmente no sul da região, e aridização do Nordeste, particularmente no semi-árido (OYAMA, NOBRE, 2003; GUIMARÃES et al., 2016; MARENGO, BERNASCONI, 2015; JESUS et al., 2019; MARENGO et al., 2020).

Mesmo com os inúmeros avanços na dinâmica, nas representações físicas e na capacidade computacional, as projeções dos modelos ainda possuem incertezas inerentes. Essas incertezas são decorrentes da discretização e processos de parametrizações, que vão sendo transmitidas de uma etapa para outra com o tempo e com os processos realizados pelo modelo. As principais fontes de incertezas estão associadas à variabilidade interna, aos modelos e às hipóteses adotadas como cenários de aquecimento futuro, e podem variar de acordo com o período para o qual a variável é projetada (GIORGI, 2005; HAWKINS, SUTTON, 2009). Quando trata-se de extremos climáticos, principalmente relacionados à precipitação, essas incertezas se tornam ainda maiores, evidenciando a necessidade de conhecer seu comportamento e estudar possíveis formas de minimizá-las (CHEN et al., 2014; GOUVEIA et al., 2022).

O *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6* (CMIP6), disponível em: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/10.24381/cds.c866074c?tab=overview>, é o conjunto de modelos globais utilizado nas análises de mudanças climáticas do IPCC e tem como nova metodologia a utilização de níveis de aquecimento ao invés dos cenários de forçantes radiativas, como no CMIP5 (IPCC, 2014; IPCC, 2018c). Esses níveis foram definidos com base no Acordo de Paris (UNFCCC, 2015), no qual estabeleceu-se o limiar de aquecimento global de 1,5 °C em relação aos níveis pré-industriais, para que os impactos sejam menores e a adaptação às mudanças proceda mais facilmente (IPCC, 2018c). O *High-End cLimate Impacts and eXtremes* (HELIX) é um projeto europeu que possui metodologia semelhante, utilizando dois modelos que compõem o CMIP6 para projetar as mudanças para os níveis de aquecimento de 1,5 °C, 2 °C, 4 °C e 6 °C. Mais informações a respeito do HELIX podem ser obtidas em <https://helixclimate.eu/>. A vantagem é que se trata de modelos climáticos globais atmosféricos (MCGAs) com alta resolução espacial (entre 30-60 km), os quais têm como condições de fronteira inferior dados de temperatura da superfície do mar (do inglês, SST) e concentração de gelo marinho (do inglês, SIC) provenientes de modelos do CMIP5 (WYSER et al., 2017). Essa recente abordagem é a que mais se aproxima dos debates nacionais e internacionais a respeito das mudanças no clima e não há artigos

científicos especificamente para a América do Sul utilizando os dados de alta resolução do HELIX para analisar as incertezas das projeções de extremos climáticos até a atualidade.

Assim, este estudo considerará as seguintes questões:

- 1) As simulações dos MCGAs de alta resolução são confiáveis o suficiente para que as projeções de eventos extremos possam ser significativas no futuro?
- 2) Quais são as incertezas dominantes nas projeções climáticas de eventos extremos de precipitação e temperatura dado diferentes valores de aquecimento?
- 3) Qual a importância de buscar esforços para limitar o aquecimento global em 1,5 °C, a fim de proteger a população e os principais ecossistemas da América do Sul?

1.1 Objetivos

O objetivo geral é avaliar as projeções de extremos climáticos dos modelos do HELIX para a América do Sul (AS) nos níveis de aquecimento de 1,5 °C, 2 °C e 4 °C, quantificando as incertezas e analisando o risco climático associado.

Os objetivos específicos são:

- Avaliar os MCGAs, comparando as simulações dos índices extremos de precipitação e temperatura com as observações provenientes do *European Centre of Medium Range Weather Forecast (ECMWF) Reanalysis v5 (ERA-5)*, *Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2)* e *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station Data (CHIRPS)*, a fim de obter a acurácia dos modelos em representá-los;
- Analisar as projeções dos extremos climáticos na AS para os níveis de aquecimento de 1,5 °C, 2 °C e 4 °C;
- Classificar a mudança esperada para o futuro dado os diferentes níveis de aquecimento específicos (SWLs), identificando sua significância e robustez dos modelos do HELIX em projetar os extremos climáticos;

- Analisar as incertezas associadas às projeções climáticas dos modelos, determinando a contribuição da variabilidade interna e variabilidade dos modelos no total de incertezas para todo o continente e, especificamente, para as sub-regiões Amazônia, Nordeste e Sul/Sudeste do Brasil.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A atmosfera é a componente essencial da vida na Terra, determinante chave de seu clima, e é nela que ocorrem as principais trocas e processos. Devido a sua composição, ela possui papel fundamental no controle da quantidade de energia radiante que adentra ao sistema e que, após interações com os gases, aerossóis e nuvens, incide na superfície ou retorna ao espaço. Essa interação ocorre conforme os processos de espalhamento, transmissão ou absorção da radiação solar. Segundo a teoria do corpo negro, a emissão das componentes atmosféricas ocorre por meio de ondas longas . Através desse balanço radiativo, diversos outros processos interativos ocorrem no sistema climático terrestre, o qual é composto pela atmosfera, juntamente com a hidrosfera, criosfera, litosfera e biosfera, formando assim a dinâmica do planeta (HARTMANN, 1994).

2.1 Mudanças climáticas: observações e projeções médias

O sistema climático é considerado altamente complexo e passível de sofrer alterações decorrentes de sua própria dinâmica interna ou por forçantes naturais e antropogênicas externas a ele. Essas perturbações são percebidas através de variações no valor médio do clima e/ou na variabilidade de seus elementos em uma determinada região ou mesmo no planeta como um todo. Dessa maneira, caracteriza-se a mudança climática, a qual deve persistir por um longo período, geralmente superior a diversas décadas, ou também não sofrer retorno ao ponto inicial, mesmo depois de longos períodos (MOSS et al., 2010).

As mudanças naturais do clima acontecem desde o início da história evolutiva do planeta, seja na composição e estrutura da atmosfera durante o processo de formação da Terra, na deriva dos continentes ou mesmo nas características do movimento de translação e no campo magnético terrestre. Porém, a percepção humana em relação a estas é pequena, pois tais variações possuem geralmente escala de milhares de anos. Apesar de todos esses fatores também influenciarem no balanço radiativo e na consequente variação da temperatura do planeta, são as erupções vulcânicas consideradas as mudanças naturais mais notórias aos humanos, uma vez que possuem alta frequência e longo tempo de permanência dos gases liberados na atmosfera, podendo contribuir para um resfriamento devido a atenuação da radiação solar pela densa pluma de fumaça (MEEHL et al., 2007).

Também, os mecanismos naturais internos têm papel fundamental na dinâmica e interação entre atmosfera, oceanos e continente, podendo determinar mudanças nos padrões de circulação, temperatura, precipitação, dentre outros. O El Niño-Oscilação Sul (do inglês, ENSO) é um dos mecanismos que atuam significativamente sobre diversas regiões do globo e influenciam diretamente na América do Sul, entre outras regiões (BJERKNES, 1969; CAI et al., 2020). Caracterizado pela alteração anômala de SST no Pacífico Equatorial, o ENSO causa mudança de intensidade dos ventos alísios na região, relação inversa de pressão atmosférica na superfície entre as Ilhas Darwin (Austrália) e Tahiti (Pacífico Sul), além de modificar os padrões de temperatura do ar e precipitação, principalmente nas regiões adjacentes (TRENBERTH, 1997; COLLINS et al., 2010; WANG et al., 2016). Também, a Oscilação Decadal do Pacífico (do inglês, PDO) segue padrões parecidos aos do ENSO, porém sua escala é multidecenal e seus efeitos são mais evidentes no setor norte do Oceano Pacífico e do continente americano, influenciando secundariamente os trópicos (MANTUA et al., 1997; ALEXANDER, 2010).

Adicionalmente, a ação antropogênica pode influenciar nas variações do clima, atenuando ou intensificando os efeitos da variabilidade natural já existente. Processos industriais, agropecuários, energéticos e automóveis são algumas das fontes emissoras de GEEs e aerossóis na atmosfera, os quais interferem no balanço de energia do planeta e, em sua grande maioria, potencializam o efeito estufa (processo natural), causando um aquecimento adicional ao sistema climático (WMO, 2016). Tal energia adicionada (retirada) ao sistema é considerada como uma forçante radiativa positiva (negativa). Devido ao crescimento populacional e econômico, a emissão e concentração desses poluentes na atmosfera são considerados sem precedentes nos últimos 800 mil anos, evidenciando a influência humana (IPCC, 2014).

O IPCC é um grupo de cientistas estabelecido pelas Nações Unidas, o qual debate as variações observadas no Sistema Climático até a atualidade e, com base em simulações e projeções de modelos globais para o passado e futuro provenientes da ciência publicada em todo o mundo, elaboram relatórios científicos com os possíveis impactos e vulnerabilidades, sugerindo medidas de redução das consequências e adaptação às futuras mudanças climáticas.

Divulgado pelo IPCC e tendo como subsídio os modelos de circulação geral (MCG) do

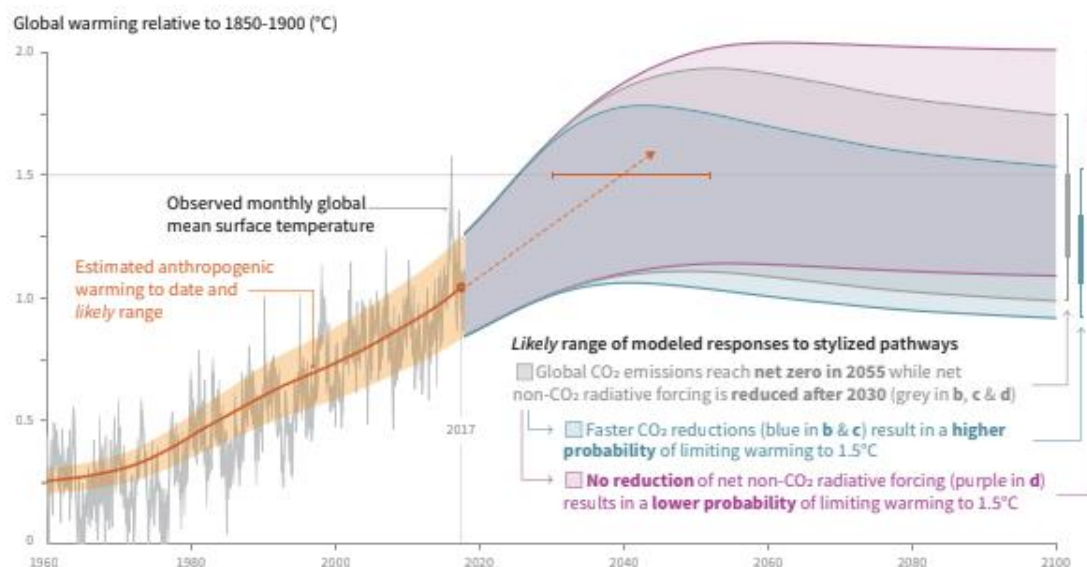
CMIP6, o 6º Relatório de Avaliação (AR6) do Grupo de Trabalho I (Física do Clima) mostra que o aquecimento do Sistema Climático é evidente e inequívoco, e tem causas antropogênicas (IPCC, 2021). Também, o relatório especial sobre os impactos de um aquecimento de 1,5 °C acima dos níveis pré-industriais (SR15) e em relação aos cenários de emissões globais de GEEs reivindica uma resposta dos tomadores de decisão à ameaça das mudanças climáticas (IPCC, 2018a).

As observações mostram que as emissões por fontes antropogênicas de GEEs, principalmente o dióxido de carbono (CO₂) e metano (CH₄), têm aumentado desde a era pré-industrial, com maiores concentrações após a década de 1980. Essas emissões causaram uma tendência de aquecimento do sistema climático, o qual alcançou 1 °C em 2017, sendo estimado acréscimo médio de 0,2 °C por década devido aos gases já existentes na atmosfera até a atualidade. Tal aquecimento é geralmente superior sobre áreas continentais do que sobre os oceanos, e alcançou 0,87 °C (entre 0,75 °C e 0,99 °C) de acréscimo da temperatura média global para o período 2006-2015 em relação a 1850-1900. Observou-se também aumento de precipitação na América do Norte, sudeste da América do Sul, norte da Europa e da Austrália, ocorrendo em contrapartida um déficit de chuva em boa parte da África, sul da Europa e sudeste da Ásia e Austrália. Além das consequências nas variações médias, houve também uma tendência de aumento em intensidade e frequência de alguns extremos climáticos e de tempo a partir de um aquecimento global de 0,5 °C. Os riscos ao sistema humano e natural são diversos e dependem de características como magnitude e duração do aquecimento, localização geográfica, nível de desenvolvimento, vulnerabilidade na região, podendo ser ainda maiores os impactos, ou até mesmo irreversíveis, caso o aquecimento global exceda 1,5 °C (IPCC, 2013; IPCC, 2018b).

As projeções indicam que, caso as emissões de CO₂ e CH₄ sejam reduzidas rapidamente, existe uma alta probabilidade de limitar o aquecimento em 1,5 °C até 2100, porém, se não houver redução da concentração desses gases, existe uma baixa probabilidade de limitá-lo a esse nível, podendo alcançar os 2 °C no final do século XXI (Figura 2.1). Mudanças significativas no clima são esperadas com o aquecimento de 1,5 °C em relação ao nível pré-industrial, incluindo elevação da SST e aumento da acidificação dos oceanos. Estes são grandes absorvedores de carbono, porém em excesso, esse gás causa diminuição da alcalinidade da água (em pH) e consequentemente dos níveis de oxigênio, causando perdas de espécies marinhas e

ecossistemas costeiros. Também, são esperadas diminuições substanciais de gelo marinho no Oceano Ártico durante o verão e derretimento tanto no polo norte quanto na Antártica, podendo causar elevação no nível do mar. As projeções indicam que haverá um aumento de 0,26 m a 0,77 m do nível médio do mar para 2100 no cenário 1,5 °C e esse aumento continuará depois do final do século XXI, mesmo se o aquecimento for limitado a 1,5 °C. Como consequência, as pequenas ilhas, áreas costeiras com nível abaixo do mar e deltas ficarão ainda mais expostas a riscos associados ao aumento do nível do mar, havendo intrusão de água salina, inundações e riscos para a infraestrutura e ecossistema regional. As mudanças serão mais severas se o nível de aquecimento global ultrapassar 1,5 °C e atingir 2 °C, acarretando em impactos de maior extensão e magnitude em comparação ao nível que deseja-se limitar (IPCC, 2018b).

Figura 2.1 - Variação da temperatura média global observada mensalmente (linha cinza) e estimativa do aquecimento global antropogênico (linha sólida laranja com intervalo de variação). Após 2017, a região cinza corresponde ao intervalo de aquecimento para um cenário hipotético de emissões de CO₂ líquida nula até 2055, a região azul mostra a resposta às reduções mais rápidas de emissões do gás (resultando em alta probabilidade de limitar o aquecimento em 1,5 °C) e a região roxa corresponde à não redução de CO₂ (resultando em baixa probabilidade de limitar o aquecimento em 1,5 °C).



Fonte: IPCC (2018a).

2.2 Projeções globais de extremos climáticos e sobre a América do Sul

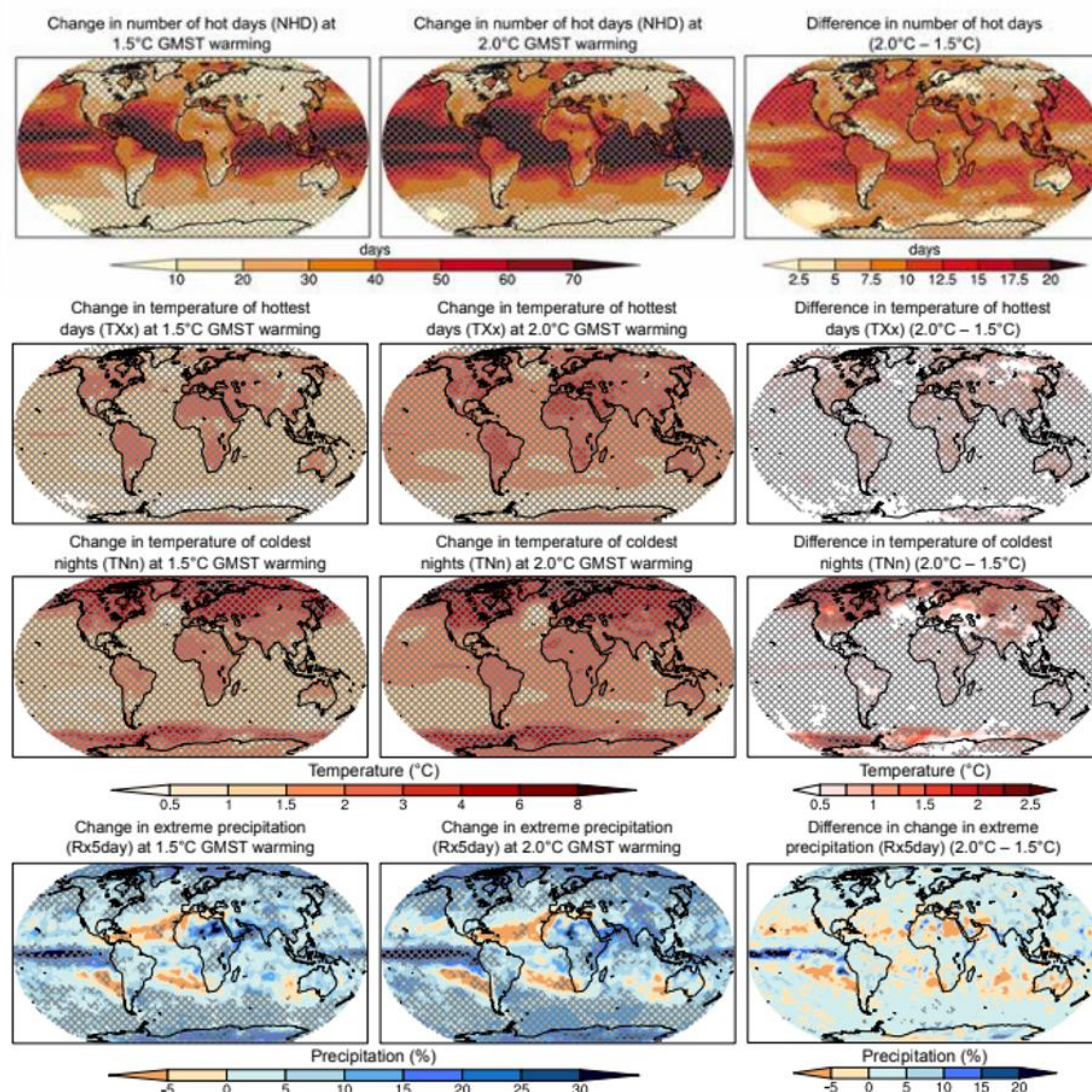
As projeções de mudanças na média são fortemente evidenciadas, principalmente quanto a um aquecimento de 2 °C. Em relação aos extremos climáticos, as projeções

indicam crescente aumento durante o século XXI (IPCC, 2021), tornando-se ainda maiores em extensão e magnitude (Figura 2.2). Segundo o Quarto Relatório do IPCC (2012), os eventos extremos são normalmente caracterizados por estarem abaixo do 10º percentil ou acima do 90º percentil da distribuição média climatológica observada, sendo distribuídos diferentemente sobre o globo, de acordo com as características locais (ex. clima, vegetação, relevo) e sazonalidade. Esses eventos podem ocorrer isoladamente, sendo chamados de extremos meteorológicos, porém quando se mostram recorrentes em um determinado período (ex. mesma estação do ano por diversos anos) e provocam impactos de magnitude considerável são chamados extremos climáticos.

As temperaturas extremas sobre o continente são projetadas para serem maiores que a temperatura da superfície média global: nas latitudes médias, a magnitude dos dias quentes terá aquecimento de 3 °C comparado ao aquecimento global de 1,5 °C, e acréscimo de 4 °C quando o aquecimento global atingir 2 °C. Além disso, o número de dias muito quentes aumentará em diversas regiões, sendo mais agravantes nos trópicos, e as noites frias também sofrerão os efeitos do aquecimento global, tornando-se menos intensas e frequentes. Em relação aos eventos de precipitação, a quantidade de episódios intensos será maior em latitudes altas do Hemisfério Norte e em regiões elevadas quando projetados para um aquecimento de 2 °C comparado a 1,5 °C, e, conseqüentemente, a fração continental afetada por inundações de grandes proporções aumentará. Quanto às secas, se tornarão mais severas em magnitude, extensão territorial e duração para a região do Mediterrâneo, Amazônia, Patagônia, nordeste da China e principalmente em regiões que já sofrem com déficits de precipitação, como é o caso da maior parte da África e do Nordeste brasileiro (SANTOS et al., 2015; RODRIGUES; MCPHADEN, 2014; MARENGO; TORRES; ALVES., 2016; IPCC, 2018b).

As conseqüências das projeções tanto na média quanto nos extremos poderão ser sentidas em diversas partes do mundo. As áreas mais impactadas serão os países tropicais, nos quais, além da mudança no clima local, existe uma vulnerabilidade ligada à falta de infraestrutura, ao subdesenvolvimento e à marginalização das populações. A América do Sul pode ser considerada uma dessas regiões vulneráveis às mudanças climáticas e sofrerá fortemente as conseqüências que elas causarão nas variáveis atmosféricas (ex. temperatura, precipitação, vento), afetando diversos setores, como saúde, agricultura, pecuária, economia, meio ambiente, além de fornecimento de energia (em sua maioria renovável), alimento e água (MARENGO et al., 2010; IPCC, 2014;

Figura 2.2 - Mudança nas projeções de extremos climáticos de temperatura (número de dias quentes - NHD, dias muito quentes - TXx, noites muito frias - TNn) e precipitação (precipitação extrema - Rx5day) para o final do século XXI para os níveis de aquecimento de 1,5 °C (coluna esquerda), 2 °C (coluna central) e a diferença entre 2 °C e 1,5 °C (coluna direita).



Fonte: IPCC (2018b).

Diversos trabalhos que analisam simulações e projeções de extremos climáticos na América do Sul vêm sendo realizados durante os últimos anos. Sillmann et al. (2013b) mostraram as mudanças globais e regionais dos índices extremos ao longo do século XXI utilizando os modelos do CMIP3 e CMIP5. As projeções apontam mudanças mais pronunciadas nos índices de temperaturas mínimas diárias em relação às máximas, assim como Skansi et al. (2013) verificou sobre a América do Sul. Noites tropicais, com temperaturas acima de 20° C, sofrerão maior aumento na região tropical (> 100 dias) e

no sul da Amazônia, enquanto as noites frias (TN10p) terão as menores mudanças em suas projeções. A tendência de aumento na intensidade dos eventos de precipitação será relativamente maior que do total de precipitação em dias muito úmidos, podendo haver grande desacordo de sinal da mudança em diversas regiões do globo para os índices de precipitação no geral. Tanto para os extremos de precipitação quanto para de temperatura, as projeções indicam mudanças mais pronunciadas no cenário RCP8.5, excedendo os cenários dos modelos CMIP3.

Valverde e Marengo (2014) analisaram extremos de precipitação sobre quatro bacias hidrográficas brasileiras (Amazônica, São Francisco, Tocantins e Paraná) utilizando o modelo ETA-HadCM3 e dados de precipitação mensal do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), precipitação diária do *Climate Prediction Center / National Oceanic and Atmospheric Administration* CPC/NOAA e de 24 estações ao longo das bacias, relacionando-os com o ENSO. Os resultados mostram aumento significativo da tendência anual de dias secos consecutivos (CDD) no sudeste da Amazônia, acima do São Francisco, norte do Paraná e ao longo do rio Tocantins, além de extremos de precipitação intensa (R20mm, Rx1day, Rx5day) positivos no nordeste da Amazônia, sudoeste do Paraná e noroeste do Tocantins. Também concluiu-se que durante anos de El Niño, os índices CDD, Rx1day e Rx5day possuem maior frequência e magnitude na bacia do São Francisco, sendo Rx1day também maior no Tocantins. Já em anos de La Niña, notou-se principalmente maior intensidade de CDD na bacia do Tocantins. Por fim, a avaliação do modelo mostrou que houve superestimativas de CDD, Rx1day e Rx5day nas quatro bacias; e, em relação às projeções para o final do século XXI, Rx1day será mais intenso no Tocantins e São Francisco enquanto períodos mais secos ocorrerão com maior intensidade em todas as quatro bacias.

Natividade et al. (2017) analisaram a tendência de extremos de precipitação e temperatura sobre o estado de Minas Gerais utilizando 19 modelos do CMIP5, dados de reanálise do *National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research* (NCEP/NCAR) e de estações convencionais. Através dos testes estatísticos de Mann-Kendall e estimador de inclinação de Sen, os resultados mostraram, tanto nas simulações do presente quanto nas projeções futuras, tendência significativa de aumento de dias e noites muito quentes (TX90p e TN90p) e uma redução de dias e noites muito frias (TX10p e TN10p) em todo o estado. Quanto aos extremos de precipitação, a tendência é pouco significativa, porém indica aumento de condições

secas no norte, representado pela tendência positiva de CDD e negativa de precipitação máxima em 5 dias (Rx5day) e dias muito úmidos (R95p) no sul do estado de Minas Gerais.

Regoto et al. (2021), utilizando dados de 265 estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e 242 séries temporais de total de precipitação diário da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), analisaram as anomalias observadas dos extremos climáticos de precipitação e temperatura sobre o Brasil para os períodos 1961-2018 e 1961-2017, respectivamente, e identificaram aumento em frequência e magnitude dos extremos quentes em todo o território, secas mais prolongadas e diminuição de episódios de chuvas sobre o NEB, além de maior quantidade de precipitações intensas sobre o Sul do Brasil.

2.3 Níveis de aquecimento e *tipping points*

O IPCC (2018b) mostra que existem regiões as quais os impactos das variações no clima serão consideravelmente altos, a ponto de haver mudança de ecossistema, sendo aproximadamente 4% das áreas territoriais mundiais para um aquecimento de 1,5 °C, podendo dobrar essa quantidade caso o aquecimento chegue a 2 °C. Tais cenários foram determinados a partir do Acordo de Paris (UNFCCC, 2015), o qual estabeleceu que os países devem fortalecer a capacidade de adaptarem-se às mudanças climáticas e controlá-las, controlando o aumento da temperatura média global abaixo de 2 °C em relação aos níveis pré-industriais e buscando esforços para limitá-la em 1,5 °C até o final do século XXI. Esse *range* de aquecimento não eliminará todas as consequências associadas às variações, porém favorecerá a adaptação humana e a biodiversidade a elas.

Em contrapartida ao Acordo, se os esforços não forem suficientes para limitar o aquecimento global em 1,5 °C e, em um cenário mais agravante, favorecer um aumento superior a 2 °C em relação ao período pré-industrial, as implicações serão ainda mais consideráveis. As estimativas mostram que existe uma probabilidade superior a 66% que a temperatura média global sofrerá acréscimo entre 2,9 °C e 3,4 °C até 2100 e, podendo ultrapassar os 4 °C regionalmente, caso não haja ação eficaz das políticas públicas (ROGELJ et al. 2016; IPCC, 2018a). Mudanças consideravelmente altas na temperatura e em outras características locais (ex. precipitação, uso do solo) podem causar transformações definitivas no ecossistema e na vegetação de uma determinada

região. Chamadas de *Dangerous Climate Change*, essas mudanças de um bioma para outro acarretam degradação e extinção de diversas espécies, uma vez que não conseguem adaptar-se ao novo ambiente (MARENCO et al., 2011).

Para investigar as circunstâncias de cada uma dessas possíveis transformações e quantificar a probabilidade de ocorrerem, é de fundamental importância determinar os *tipping points*, os quais são os pontos críticos de um elemento que causaria a alteração de um estado de equilíbrio para outro qualitativamente diferente, não havendo retorno. A escala de tempo para atingir plenamente o equilíbrio após transgredir o *tipping point* pode ser rápida ou levar várias décadas, ou até mesmo um século, em comparação às escalas naturais de mudança (LENTON et al., 2008). Os ecossistemas sul-americanos os quais possuem maior vulnerabilidade às variações de temperatura e precipitação são a floresta Amazônica e a Caatinga, podendo sofrer em maiores proporções os efeitos do aquecimento global do que a maioria das regiões no globo (SEDDON et al., 2016).

A Amazônia pode sofrer perturbações em seu clima provenientes de desmatamento, aquecimento global, incêndios florestais, altas concentrações de CO₂ e mudanças nos extremos climáticos (ex. inundações e secas prolongadas). Estudos sugerem que partes da Amazônia podem sofrer processo de savanização, principalmente o sul e leste da região, caso os *tipping points* de aquecimento superior a 4° C e/ou desmatamento da floresta nativa acima de 40% do total sejam alcançados (OYAMA, NOBRE, 2003; NOBRE, BORMA, 2009). A redução nas taxas de precipitação na região, as quais são mantidas tanto pelos fluxos de evaporação provenientes do Oceano Atlântico tropical quanto pela evapotranspiração da própria floresta (SALATI et al., 1979; NOBRE et al., 2016), acarretam em perda natural de cobertura vegetal que, juntamente com os desmatamentos e incêndios antropogênicos (utilizados para limpar áreas posteriormente utilizadas como pastagem e lavouras) transformam a floresta amazônica (considerada sumidouro de carbono) em fonte de CO₂ (SAMPAIO et al., 2007). Assim, a combinação desses três fatores (aquecimento global, desmatamento e queimadas) pode conduzir a região a um novo *tipping point*, o qual consideraria desmatamento de 20-25% da floresta original para que regiões amazônicas passem a ser irreversivelmente caracterizadas como savanas (LOVEJOY, NOBRE, 2018).

Estudos mostram que episódios isolados de secas e enchentes de magnitude nunca registradas na região amazônica estão ocorrendo nos últimos anos, mostrando que o

processo de transformação do clima (MARENGO et al., 2011) e consequente mudança definitiva na vegetação pode estar em andamento e próximo ao *tipping point*. Segundo o 49º Boletim de Alerta Hidrológico da Bacia do Amazonas, em novembro de 2023, o Rio Negro esteve em seu menor nível já registrado em 121 anos de medição, e a seca na região foi considerada a mais severa na história de Manaus desde 1902, quando o rio começou a ser monitorado, causando impactos consideravelmente grandes para a fauna, flora e população locais (SGB, 2023).

Também, episódios de secas intensas e prolongadas vêm sendo observados na região Nordeste do Brasil há diversos anos (SANTOS et al., 2012; MARENGO, BERNASCONI, 2015; GUIMARÃES et al., 2016) e as projeções indicam déficit de chuvas e consequente aumento da aridez na região para o século XXI (IPCC, 2014, SANTOS et al., 2012; COSTA et al., 2015; MARENGO; TORRES; ALVES., 2016; IPCC, 2018c; MARENGO et al., 2019; ALMAZROUI et al., 2021). Essa região é considerada vulnerável aos extremos de temperatura e precipitação, principalmente relacionados às secas, que podem acarretar em insegurança hídrica, alimentar e energética, e grave impacto social para a população (IPCC, 2014). Com as mudanças climáticas e as projeções sobre a área, aliadas às mudanças de uso e cobertura do solo, que podem ser devido a processos naturais (decorrente do clima) ou antropogênicos (retirada da vegetação natural para transformá-las em áreas agrícolas), o Nordeste pode atingir o *tipping point*, favorecendo a ocorrência definitiva de aridização e desertificação em partes da região (OYAMA, NOBRE, 2003; GUIMARÃES et al., 2016). Marengo e Bernasconi (2015), Jesus et al. (2019) e Marengo et al. (2020) mostraram o risco climático de aridização, respectivamente, sobre o Nordeste e sobre o semi-árido do Sergipe, encontrando em ambos os estudos projeções de aridização para o final do século XXI, e risco de desertificação em algumas áreas as quais sofrerão mais intensamente com as secas e aquecimento.

O relatório especial do IPCC, publicado em 2019, analisa as mudanças climáticas e os impactos nos sistemas continentais aliado ao uso antropogênico do solo, como desertificação, degradação da terra, fluxos de GEEs em ecossistemas, além de explicar sobre a segurança alimentar e o manejo sustentável. As projeções indicam que as zonas áridas sofrerão expansão e as zonas climáticas polares diminuirão em área até o final do século XXI (IPCC, 2019). Além da Amazônia e do semi-árido nordestino, como ditos anteriormente, estão também entre os biomas mais ameaçados a tundra, típica das

regiões do ártico; porções da Floresta Boreal, que cobre parte do Alasca e do Canadá; o leste da Austrália; matas de clima temperado encontradas em regiões alpinas; e a camada de *permafrost* na Sibéria, a qual seu derretimento pode potencializar a liberação de CO₂ e CH₄ provenientes da decomposição de matéria orgânica das rochas descongeladas. A possibilidade de ocorrer mudanças abruptas e definitivas no clima e ecossistema dessas regiões evidenciam a necessidade de limitar o aquecimento global em 1,5 °C, a fim de evitar que os *tipping points* sejam atingidos (IPCC, 2018a; IPCC, 2019).

2.4 Modelos de alta resolução: HELIX

Para simular o comportamento do Sistema Climático e gerar projeções a respeito do estado futuro do planeta, utiliza-se comumente os modelos climáticos, os quais são compostos de equações matemáticas representativas das leis físicas, químicas e biológicas que regem os movimentos e as interações entre as componentes do sistema. Os MCGs são atualmente utilizados pelo IPCC para analisar o comportamento de diversas variáveis meteorológicas até o final do século XXI, podendo ser considerados razoavelmente hábeis em simulá-las (KNUTTI, 2008; IPCC, 2018c). Porém, como possuem baixa resolução espacial, juntamente com problemas nas parametrizações (complexidade ou pouco conhecimento de processos), impossibilita a representação de processos dinâmicos mais detalhados em uma determinada área, o que é de primordial importância em análises de extremos climáticos, seus impactos, vulnerabilidade e possíveis medidas de prevenção e adaptação em uma região. Assim, modelos regionais com altas resoluções têm mostrado melhor performance em representar realisticamente processos regionais, como ciclo hidrológico (DEMORY et al., 2013), precipitação (VAN HAREN et al., 2015; JIA et al., 2015), circulação oceânica (WINTON et al., 2014) e extremos climáticos (CHOU et al., 2014).

O HELIX, por exemplo, é um projeto de investigação colaborativa financiado pela União Européia, o qual avalia os potenciais impactos das mudanças climáticas utilizando modelos atmosféricos de alta resolução (EC-EARTH3-HR e HadGEM3). Além da resolução espacial mais detalhada (30-60 km), a qual aperfeiçoa a representação de processos físicos e extremos em todo o globo, ambos são modelos climáticos globais atmosféricos (MCGAs) e não necessitam de condições de fronteiras laterais, como no caso dos modelos regionais, apenas levando em consideração as

informações de SST e SIC (WYSER et al., 2017; BETTS et al., 2018; KOUTROULIS et al., 2018).

Composta por cientistas de 16 organizações em todo o mundo, atualmente esse projeto possui abordagem semelhante ao AR6 (IPCC, 2021, 2023) e à metodologia utilizada nos modelos do CMIP6, desenvolvendo cenários futuros como consequência do aquecimento global de 1,5 °C, 2 °C, 4 °C e 6 °C em relação ao período pré-industrial, seja devido a forçantes naturais ou antropogênicas. As projeções de SST e SIC de alguns modelos do CMIP5 foram utilizados como condições de fronteira inferior para os modelos do HELIX (WYSER et al., 2017) e diversos estudos para regiões de todo o globo tem avaliado seus resultados para SWLs de 1,5 °C, 2 °C e 4 °C (Tabela 2.1). O conceito do SWL representa a variação da anomalia da temperatura média global em relação ao período pré-industrial (anterior a 1900).

Betts et al. (2018) utilizaram projeções de um dos modelos do HELIX, o HadGEM3, nos níveis de aquecimento de 1,5 °C e 2 °C, a fim de analisar as mudanças dos extremos climáticos e suas implicações na disponibilidade de água doce e vulnerabilidade à insegurança alimentar no futuro. Os resultados concordam com o IPCC (2018c, 2019), nos quais as projeções de magnitude da mudança dos extremos serão, no geral, superiores para um aquecimento global de 2 °C em relação a 1,5 °C. Os extremos de temperatura tornam-se mais quentes, enquanto os de precipitação mostram variação positiva e negativa de precipitação abundante ou escassa, dependendo da região. Apesar das incertezas dos modelos, os quais produzem resultados diferentes, os impactos hidrológicos apontam, em média, para condições mais úmidas e eventos de precipitação intensa no leste e sul da Ásia. Em contrapartida, a América do Sul e a porção sul da África poderão sofrer com secas mais prolongadas e diminuição do escoamento dos rios, sendo reduzido em 25% sobre a Amazônia. O aumento de eventos de precipitação intensa ou secas implica no crescimento da vulnerabilidade à insegurança alimentar, podendo ser menos impactante em aproximadamente 76% dos países em desenvolvimento caso o aquecimento global consiga ser limitado a 1,5 °C.

Dosio et al. (2018), utilizando ambos os níveis de aquecimento (1,5 °C e 2 °C), analisou as ondas de calor através das projeções do modelo EC-EARTH3, também pertencente ao HELIX. Concluiu-se que, mesmo limitando o aquecimento em 1,5 °C, as projeções indicam um aumento significativo na intensidade da onda de calor para a América do

Sul, África e sudeste da Ásia, sendo a frequência desse evento duas vezes superior quando comparado ao cenário de aquecimento de 2 °C. Caso as políticas públicas e esforços sejam eficientes em conter o aquecimento global abaixo de 1,5 °C, 13,5% da população estará exposta a fortes ondas de calor pelo menos uma vez a cada 5 anos e 9% a cada 20 anos. Estas frações de população atingida pelas ondas de calor tornam-se aproximadamente 3 vezes superiores se o aquecimento global alcançar 2 °C, atingindo cerca de 2 bilhões de pessoas ao redor do mundo.

Tabela 2.1 - Trabalhos utilizando projeções dos MCGAs do HELIX para diferentes regiões do mundo. Os sobrescritos ao nome dos autores corresponde ao SWL de 1,5 °C [1], 2 °C [2] e 4 °C [3].

IMPACTO	MCGAs	REGIÃO	AUTORES
Inundações	EC-EARTH3-HR	Global	Alfieri et al, 2017 ^[1,2,3]
	EC-EARTH3-HR / HadGEM3	Bangladesh	Mohammed et al., 2018 ^[1,2,3]
Seca	EC-EARTH3-HR	Global	Naumann et al., 2018 ^[1,2]
Onda de calor	EC-EARTH3-HR	Global	Dosio et al., 2018 ^[1,2]
	HadGEM3	Global	Betts et al., 2018 ^[1,2]
Extremos	HadGEM3	Brasil	Marengo et al., 2021 ^[1,2,3]
	HadGEM3	Global	Betts et al., 2018 ^[1,2]
Vulnerabilidade à escassez de água potável	HadGEM3	Global	Betts et al., 2018 ^[1,2]
	EC-EARTH3-HR	Europa	Koutroulis et al., 2018 ^[1,2,3]
Insegurança alimentar	HadGEM3	Global	Betts et al., 2018 ^[1,2]
Risco de desastres hidro-geo- meteorológicos	HadGEM3	Brasil	Marengo et al., 2021 ^[1,2,3]

2.5 Incertezas nas projeções climáticas

Os MCGs, mesmo quando dispõe de resolução espacial mais acurada, possuem incertezas associadas às diversas etapas da projeção, uma vez que o Sistema Climático é complexo e turbulento, possui processos não-lineares pouco conhecidos, além dos modelos, dados e métodos utilizados não serem perfeitos. As etapas de uma projeção climática abrangem a adoção de hipóteses socioeconômicas para produzir os cenários de emissões de GEEs e aerossóis, cálculo das concentrações desses gases utilizando

modelos químicos e biológicos, simulações das mudanças climáticas e forçantes radiativas associadas, além de considerar as políticas públicas em relação a medidas de adaptação e mitigação, mudança de uso do solo, interação entre as componentes do sistema, para finalmente analisar os impactos à biodiversidade e à humanidade por meio de modelos numéricos. Cada uma dessas etapas possui uma incerteza associada, a qual é repassada à etapa posterior, acumulando assim as incertezas e resultando em sua totalidade ao final do processo de simulação do modelo. Caso as projeções sejam regionais, o total dessas incertezas é transmitido para a mesma, devido às condições de fronteiras laterais serem provenientes de MCGs (MEARNS et al., 2001; GIORGI, 2005).

Assim, as incertezas nas projeções de mudanças climáticas podem ter três fontes distintas (MEARNS et al., 2001; GIORGI, 2005; HAWKINS, SUTTON, 2009). A primeira está ligada à **variabilidade interna** do sistema climático, o qual tem natureza turbulenta e possui flutuações naturais, mesmo quando não há uma forçante (ex. ENSO, PDO), além das condições iniciais que representam as superfícies e oceanos. A segunda é a **incerteza do modelo**, relacionada com a resolução espacial, as parametrizações de processos sub-grade (ex. camada limite planetária, turbulência, convecção, fluxos radiativos, superfície terrestre, oceano) e os algoritmos numéricos escolhidos. Essas configurações diferem de um modelo para outro, ou de versões distintas de um mesmo modelo, pois dependem da física utilizada para representar os processos e da capacidade computacional de gerar as projeções, a qual vem evoluindo com o tempo. Assim, sob um mesmo cenário de forçante radiativa, modelos diferentes geralmente geram projeções distintas. A terceira corresponde à **incerteza do cenário**, uma vez que a natureza estocástica das emissões futuras de GEEs e aerossóis, por exemplo, faz com que o nível de aquecimento global projetado e, portanto, o clima futuro, sejam repletos de incertezas. Neste estudo, a incerteza dos cenários não foi considerada, já que as projeções se referem a um único cenário futuro. A incerteza dominante no total de incertezas está ligada às características dos modelos (GIORGI, 2005) e a importância relativa de cada uma das fontes pode variar com o tempo de projeção e as escalas (espaciais e temporais).

Alguns trabalhos têm avaliado e quantificado as incertezas inerentes às projeções climáticas em todo o mundo, e particularmente, sobre a América do Sul. Hawkins e Sutton (2009) mostram que, para o futuro próximo (10-20 anos), a variabilidade interna

e os modelos são as maiores fontes de incertezas para projeções globais de temperatura e precipitação. Porém, quando analisadas projeções para o final do século, as incertezas dominantes foram dos modelos e dos cenários. As vantagens de particionar a incerteza por fontes são auxiliar no desenvolvimento de novas metodologias que corroborem com a redução das incertezas (HAWKINS, SUTTON, 2009, 2011), aplicando-se métodos de correção, além de possibilitar conhecer quais as incertezas mais relevantes em um determinado período de projeção (KARMALKAR, BRADLEY, 2017).

Torres (2014), utilizando simulações e projeções de modelos do CMIP3 e CMIP5, além de dados observacionais do *Climatic Research Unit / University of East Anglia* (CRU/UEA), investigou as incertezas em relação à temperatura e precipitação médias no futuro sobre a América do Sul. Através do método *Reliability Ensemble Averaging* (REA), o qual faz uma média ponderada dos modelos de acordo com seu desempenho em representar o clima atual, e da Inferência Bayesiana, utilizada para combinar os modelos por meio de distribuições de probabilidade. Os resultados mostram que ambos os conjuntos possuem boa representação da média sazonal e anual das variáveis, possuindo pequenos vieses sobre os Andes, Nordeste do Brasil, bacia amazônica e noroeste do continente. Porém os modelos do CMIP5 apresentaram melhor concordância com as observações e consequente confiabilidade superior ao CMIP3. Em relação à mudança de temperatura, as projeções sofrem decréscimo de 0,5 °C a 1 °C comparado à média aritmética simples, com maior confiabilidade sobre a bacia do Prata e maiores incertezas na Amazônia. Observou-se ainda que há uma probabilidade acima de 90% do aumento de temperatura exceder 2 °C para todo o continente durante o ano, tendo 50% de probabilidade de ser superior a 4 °C no noroeste da América do Sul, Nordeste brasileiro e bacia amazônica. Já as mudanças na precipitação têm a mesma magnitude das incertezas e são comparáveis à variabilidade natural.

Chen et al. (2014) também utilizou MCGs do CMIP5 para o cenário RCP4.5, porém avaliando as projeções de mudança de extremos de precipitação para todo o globo e as incertezas associadas. Os modelos apresentaram alto desempenho em simular o presente quando foram comparados aos dados de 16 mil estações meteorológicas espalhadas sobre o globo e dados de satélite do CPC/NOAA, particularmente em resultados de *ensemble* multi-modelos (do inglês, MME). As projeções indicam maior confiabilidade em latitudes altas do Hemisfério Norte, havendo alta probabilidade de ocorrer extremos positivos de precipitação e consequentes inundações no futuro na região, e os menores

níveis de confiança foram observados sobre os trópicos. Em contraste, a bacia amazônica, a Austrália e a porção sul da África possuem confiabilidades relativamente altas em relação ao aumento de extremos negativos, tornando-se áreas mais secas no futuro. Em relação às fontes de incertezas, as análises indicam que a variabilidade interna e dos modelos são dominantes nas projeções dessa variável, sendo esta última incerteza consideravelmente maior e crescente com o tempo de projeção. Por fim, os resultados mais detalhados mostram que ambas as fontes possuem maior desempenho nas escalas sazonais e regionais do que nas análises anuais sobre todo o globo.

Gouveia et al. (2022), por meio de reanálises do NCEP/NCAR e simulações e projeções de 31 modelos do CMIP5, avaliou as incertezas de extremos de precipitação e temperatura sobre a América do Sul utilizando a Inferência Bayesiana. Observou-se que os MCGs simularam melhor os extremos de temperatura, havendo pequenos vieses sobre a região equatorial; já os índices de precipitação apresentaram os maiores vieses em relação às reanálises, sendo CDD subestimado sobre os Andes e todos os índices superestimados sobre o noroeste do continente e maior parte do Brasil (exceto região Sul). Quanto às mudanças nas projeções, os resultados evidenciam aumento de estiagem (CDD) sobre o Nordeste e de aumento de episódios intensos e prolongados de chuva (R95p, Rx5day) sobre a maior parte da América do Sul, sendo mais evidente no Brasil sobre a região Sul. Com a média bayesiana, as mudanças nos índices de precipitação diminuíram ligeiramente em relação à média simples dos MCGs, suavizando em extensão e magnitude as projeções sobre o continente, o que significa que aos modelos com mudanças mais discrepantes foram atribuídos menores pesos. Os maiores valores de mudança dos índices de temperatura foram encontrados sobre a região equatorial, diminuindo em direção às latitudes mais altas, além das projeções mostrarem diminuição de TN10p e TX10p, e aumento de TN90p e TX90p, evidenciando o decaimento de eventos frios sobre a área, concluindo também que não houve diferença considerável em relação ao método bayesiano. Os MCGs apresentaram diferentes ponderamentos para cada região e índice extremo, mostrando maiores incertezas nas projeções dos eventos de precipitação e boa concordância entre os modelos quando analisados os extremos de temperatura, concluindo também que o cenário de forçante radiativa maior RCP8.5 possui menor incerteza associada do que os cenários mais otimistas RCP2.4 e RCP4.5.

Alguns estudos avaliaram, através de modelos regionais ou globais, as incertezas de projeções climáticas médias para diversas regiões do mundo (HAWKINS, SUTTON, 2009; HEO et al., 2014) e da América do Sul (BLÁZQUEZ, NUÑEZ, 2013; JOETZJER et al., 2013; TORRES, 2014; SANTOS et al., 2015; SILVEIRA et al., 2016), porém são poucos os trabalhos que analisam as incertezas para extremos climáticos (SUNYER et al., 2014; IIZUMI et al., 2017; CHEN et al., 2014; BETTS et al., 2018), principalmente focados na região (GOUVEIA, 2018; GOUVEIA et al., 2022). Além disso, nenhum destes aborda a quantificação de incertezas especificamente para a América do Sul utilizando modelos climáticos globais de alta resolução (em comparação com os modelos já utilizados no CMIP e relatórios do IPCC) e com a nova abordagem de níveis de aquecimento do IPCC (2021), evidenciando a importância do presente estudo.

3 METODOLOGIA

3.1 Região de estudo

A área de estudo compreende toda a América do Sul, entre as latitudes 13,75°N-57,5°S e as longitudes 84°W-32,5°W (Figura 3.1). Tal região apresenta grande vulnerabilidade às mudanças climáticas, uma vez que, segundo o IPCC (2014, 2018b, 2021), países de clima quente, com economia subdesenvolvida e em desenvolvimento, e as populações marginalizadas no geral serão os mais impactados tanto pelas variações na média quanto nos extremos. Também, foram delimitadas sub-regiões de estudos mais detalhados, as quais foram escolhidas por tratar-se de áreas fortemente afetadas pelas secas, queimadas, desastres naturais associados às precipitações intensas. As três sub-regiões são:

- Amazônia - AMZ (lat. 5°N-13,75°S / lon. 72°W-48°W)
- Nordeste do Brasil - NEB (lat. 2,5°S-15,5°S / lon. 45°W-34,5°W)
- Sul e Sudeste do Brasil - S/SEB (lat. 15,5°S-34,5°S / lon. 58,5°W-40°W)

Ressalta-se que foram utilizados apenas os dados referentes às áreas continentais. Os dados sobre o oceano foram desconsiderados, não havendo assim impactos deles sobre os resultados nas sub-regiões.

Figura 3.1 - Domínio de estudo. As áreas delimitadas indicam as sub-regiões nas quais foram feitas análises mais detalhadas: Amazônia (AMZ - retângulo azul), Nordeste do Brasil (NEB - retângulo amarelo) e Sul e Sudeste do Brasil (S/SEB - retângulo vermelho). Os dados são referentes apenas à área continental, sendo desconsiderados os pontos sobre o oceano.



3.2 Dados

3.2.1 Simulações e projeções

Para o cálculo dos extremos climáticos, foram utilizados dados diários de temperatura máxima, temperatura mínima e precipitação dos modelos EC-EARTH3-HR e HadGEM3, os quais são integrantes do HELIX e ambos versões de transição dos experimentos do CMIP5 e CMIP6 (WYSER et al., 2017). Considerados MCGAs de alta resolução (entre 40 e 60 km) e com processos dinâmicos e parametrizações atualizados, tais modelos abrangem simulações para 1981-2010 e projeções para 2011 até o final do século XXI, sendo algumas rodadas disponíveis além de 2100.

O EC-EARTH3 v3.1 (HAZELEGER et al., 2012) é uma versão atualizada do v2.3, o qual foi usado no CMIP5. Rodado pelo *Swedish Meteorological and Hydrological Institute* (SMHI) e desenvolvido pelo ECMWF, esse modelo inclui superfície terrestre, oceano, gelo marinho, biogeoquímica dos oceanos, vegetação dinâmica, composição atmosférica, aerossol e componentes da cobertura de gelo. As principais diferenças em comparação à versão anterior estão relacionadas a melhores representações da interação da radiação com nuvens subgrade, por meio da introdução de esquemas de radiação (MORCRETTE et al., 2008), nova microfísica de hidrometeoros (FORBES et al., 2011) e melhoramentos no esquema de convecção, que, em combinação, ajudaram na melhor representação da precipitação tropical; além de uma nova conservação de umidade, para suprir as fontes e sumidouros espúrios (DIAMANTAKIS, FLEMMING, 2013). Para as simulações e projeções do HELIX, a versão de alta resolução do modelo (EC-EARTH3-HR) possui resolução horizontal de $0,35^\circ$ (~ 40 km); 91 níveis verticais, dos quais 29 foram recém adicionados, em sua maioria, na estratosfera; e mostra melhor performance em estudos de variabilidade e extremos climáticos, como inundações (ALFIERI et al., 2017; KOUTROULIS et al., 2018), ondas de calor (DOSIO et al., 2018) e secas (NAUMANN et al., 2018).

O HadGEM3 (HEWITT et al., 2011), rodado pelo *Met Office Hadley Centre* (MOHC) e desenvolvido pelo *United Kingdom Met Office* para aplicação em previsão de tempo e pesquisas climáticas, corresponde à terceira geração dos modelos HadGEM, o qual sua segunda versão (HadGEM2) foi utilizada no CMIP5. As principais melhorias em relação ao HadGEM2 incluem mudanças significativas na dinâmica do modelo, como

na representação do acoplamento oceano-atmosfera, vegetação dinâmica, biologia marinha e química atmosférica, além de novos níveis verticais (85 em comparação a 38) para aperfeiçoamento da representação de processos estratosféricos (WOOD et al., 2014). As simulações e projeções de alta resolução do HELIX foram realizadas utilizando a componente atmosférica HadGEM3-A *Global Atmosphere* (GA) 3.0 do modelo acoplado, as quais possuem 85 níveis verticais (sendo 50 abaixo de 18 km) que se estendem por aproximadamente 85 km de altura; e resolução horizontal é de $0,556^\circ \times 0,833^\circ$ de latitude/longitude (WALTERS et al., 2017). O MOHC tem rodado o modelo acoplado HadGEM3-GC2 nessa mesma resolução horizontal (~ 60 km) para previsão sazonal e decadal, já sendo observado diversas vantagens quanto a resolução mais refinada (KNIGHT et al., 2014; MACLACHLAN et al., 2014) e em relação a estudos de eventos extremos (BETTS et al., 2018).

Todas as simulações e projeções utilizaram como condições de fronteira inferior dados de SST e SIC referentes ao cenário RCP8.5 (VAN VUUREN et al., 2011) de modelos do CMIP5 (Tabela 3.1) para representar a emissão de gases do efeito estufa relativamente alta no século XXI (RIAHI et al., 2011; MOSS et al., 2010), formando assim um conjunto de 13 diferentes projeções, e possibilitando que seus resultados sejam facilmente comparáveis com outros trabalhos de clima (VALVERDE, MARENGO, 2014; SILVA et al., 2014, 2015; NATIVIDADE et al., 2017; GOUVEIA, 2018). Cada um desses modelos forçantes foi escolhido com base em alguns critérios de variações climáticas em 3 regiões de estudo (Europa, Sudeste da Ásia e Sul da África), os quais consideraram alta e baixa sensibilidade climática, diferentes vieses na climatologia de precipitação e mudanças globais nos padrões da precipitação (WYSER et al., 2017). Os modelos do HELIX com condições de fronteira de SST e SIC de modelos do CMIP5 foram comparados com os próprios modelos forçantes, resultando em uma melhor representação da orografia, dos contrastes continente-oceano e de processos de pequena escala (convecção) pelos modelos de alta resolução, permitindo assim variações de temperatura e precipitação, e conseqüentemente representação dos extremos, mais realísticas sobre áreas montanhosas e linhas costeiras. Além da melhor resolução, a física envolvida em cada modelo também acarreta em diferença nos seus resultados (WYSER et al., 2017).

As projeções dos modelos foram consideradas para três níveis de SWL, os quais são 1,5 °C, 2 °C e 4 °C. Os SWL referem-se ao aumento da temperatura média global à

superfície (TMG) em relação ao período pré-industrial (1861-1880) e são definidos com base no período de 20 anos em torno da data em que a média móvel da TMG atinge determinado SWL, como detalhado por Gohar et al. (2014) e mostrado na Tabela 3.1. Devido à variabilidade inter-modelos, os diferentes SWLs são alcançados pela TMG em momentos distintos, dependendo do modelo de forçante do CMIP5.

Tabela 3.1- MCGAs do HELIX, seus respectivos modelos forçantes os quais forneceram condições de fronteira de SST e SIC, período e ano em que a TMG atinge os diferentes SWLs. As projeções assinaladas com * não foram incluídas.

MCGAs HELIX	Modelo forçante	Período	Ano que atinge SWL		
			1,5 °C	2 °C	4 °C
EC-EARTH3-HR	IPSL-CM5A-LR	1971-2120	2015	2030	2068
	GFDL-ESM2M	1971-2100	2040	2055	2113*
	HadGEM2-ES	1971-2125	2027	2039	2074
	EC-EARTH	1971-2100	2019	2035	2083
	GISS-E2-H	1971-2130	2022	2038	2102
	IPSL-CM5A-MR	1971-2100	2020	2034	2069
	HadCM3LC	1971-2100	2003	2020	2065
HadGEM3	IPSL-CM5A-LR	1971-2099	2015	2030	2068
	GFDL-ESM2M	1971-2099	2040	2055	2113*
	HadGEM2-ES	1971-2099	2027	2039	2074
	IPSL-CM5A-MR	1971-2099	2020	2034	2069
	MIROC-ESM-CHEM	1971-2099	2023	2035	2071
	ACCESS1-0	1971-2099	2034	2046	2084

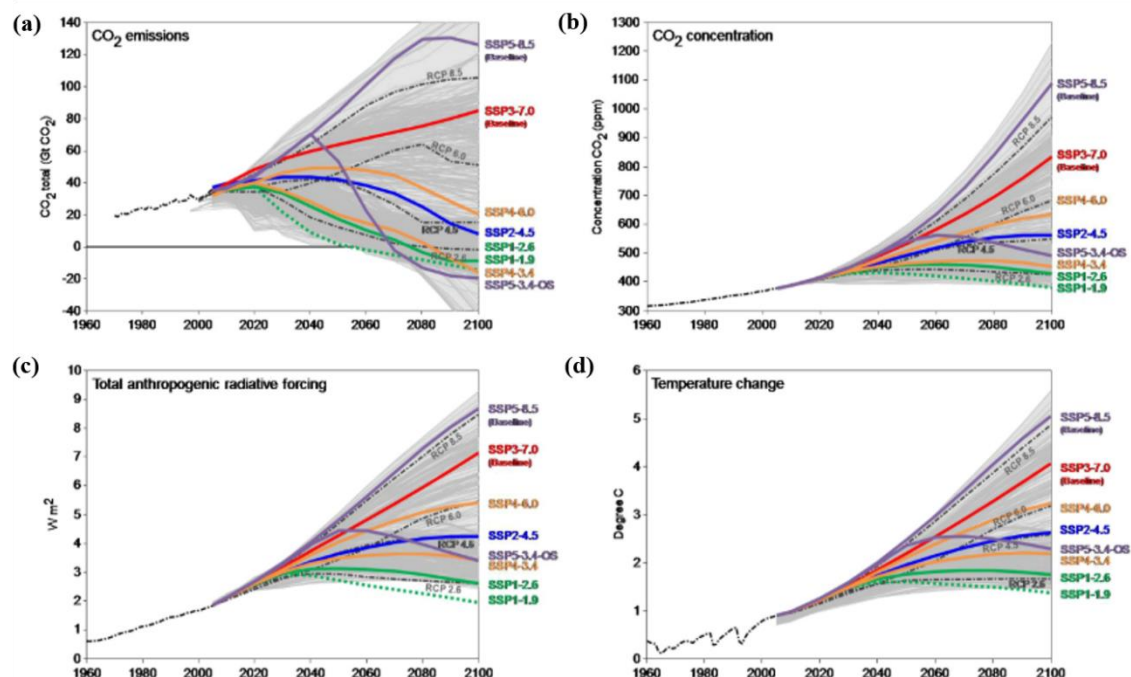
Uma metodologia semelhante, a qual considera os níveis de aquecimento, também está sendo utilizada no conjunto CMIP6 e nas análises de mudanças climáticas do relatório do IPCC, o AR6 (IPCC, 2021, 2023), como mostrado também pelo Relatório Especial sobre impactos do aquecimento global de 1,5 °C relativo aos níveis pré-industriais (IPCC, 2018a,b,c). Diferentemente da atual geração de cenários e conjunto de modelos do IPCC, o CMIP5 é a versão anterior disponível para consulta, relativa ao Quinto Relatório de Avaliação (AR5), e gera projeções climáticas de centenas de variáveis meteorológicas ao redor do globo. Nela, as simulações referentes ao clima do século XX são caracterizadas como experimento de controle e recebem o nome “*historical*”. Já as projeções de mudanças climáticas para o século XXI são baseadas na sintetização de alguns parâmetros (lançamento futuro de GEEs, aerossóis e outros poluentes na atmosfera; uso e cobertura do solo), resultando em cenários de forçante radiativa, chamados de “*Representative Concentration Pathways*” (RCPs), os quais representam

um aumento relativo às condições pré-industriais de $2,6 \text{ Wm}^{-2}$ (RCP2.6), $4,5 \text{ Wm}^{-2}$ (RCP4.5), $6,0 \text{ Wm}^{-2}$ (RCP6.0) e $8,5 \text{ Wm}^{-2}$ (RCP8.5) de energia armazenada no sistema climático (MOSS et al., 2010).

Já o CMIP6 é composto por experimentos de diagnóstico, validação e caracterização do clima (do inglês, DECK), simulações (*historical*) e projeções climáticas multi-modelos baseadas em cenários alternativos, os quais são diretamente relevantes à sociedade em relação à mitigação, adaptação ou impactos das mudanças climáticas. Essas simulações foram produzidas com *integrated assessment models* (IAM) baseados em novos cenários futuros de desenvolvimento social chamados *Shared Socioeconomic Pathways* (SSPs), e relacionados aos RCPs (RIAHI et al., 2016). Os cenários SSPs constituem dois conjuntos: o primeiro abrange uma ampla gama de incertezas no futuro, sendo continuações dos níveis de forçante radiativa RCP2.6 (SSP1-2.6), RCP4.5 (SSP2-4.5) e RCP8.5 (SSP5-8.5), além de um cenário adicional caso não houvesse mitigação (SSP3-7.0), com altas emissões de aerossóis e mudanças de uso da terra. O segundo conjunto inclui cenários adicionais de interesse, como o de forçante radiativa relativo ao RCP6.0 (SSP4-6.0), um cenário que aborda políticas de mitigação com forçante radiativa entre RCP2.6 e RCP4.5 (SSP4-3.4), um cenário de forçante radiativa abaixo do RCP2.6, limitando a temperatura média global em $1,5^\circ \text{ C}$ em relação aos níveis pré-industriais (SSP1-1.9 ou SSPa-b), e um cenário *overshoot* (SSP5-3.4-OS), com implicações políticas de um pico e posterior declínio da forçante radiativa durante o século XXI (O'NEILL et al., 2016).

Para fins comparativos, a Figura 3.2 mostra as emissões de CO_2 (a), concentrações de CO_2 (b), forçante radiativa antropogênica (c) e temperatura média global (d) para os diferentes cenários SSPs do CMIP6 em comparação com os cenários RCPs do CMIP5. Pode-se observar que os SSPs são bastante abrangentes e englobam quase a totalidade das trajetórias de RCPs a respeito das concentrações de CO_2 , forçante radiativa antropogênica e temperatura, e a maioria das projeções para emissões de CO_2 (O'NEILL et al., 2016, RIAHI et al., 2016).

Figura 3.2 - Emissões de CO₂ (a), concentrações de CO₂ (b), forçante radiativa antropogênica (c) e temperatura média global (d) para os diferentes cenários SSPs. Áreas cinzas representam o range de cenários da base de dados do AR5 do IPCC, incluindo RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 e RCP8.5.



Fonte: O'Neill et al. (2016), adaptado de Riahi et al. (2016).

3.2.2 Reanálises e observações

Para comparação com as simulações dos modelos do HELIX, foram usadas as reanálises de temperatura máxima e mínima provenientes do ERA-5 do ECMWF, com resolução espacial de 0,25° x 0,25° de latitude/longitude e escala temporal horária (HERSBACH et al., 2020); e provenientes do MERRA-2 da *NASA's Global Modeling and Assimilation Office* (GMAO), com resolução de 0,5° x 0,625° e escala diária (GELARO et al., 2017).

O ERA-5, disponível na *Climate Data Store* (CDS), é a quinta geração de reanálises atmosféricas do ECMWF e assimila observações provenientes de diferentes fontes (satélites, aviões, radiossondas, dentre outras) com uma previsão do modelo no tempo anterior, objetivando obter uma melhor estimativa do estado da atmosfera e consequente melhoramento da previsão. O método de assimilação utilizado 4D-Var considera o momento exato das observações e a evolução do modelo dentro da janela de

assimilação, permitindo a saída dos dados em horas, o que fornece uma evolução mais detalhada de eventos climáticos específicos e grande melhoria em relação ao ERA-Interim, além de incluir informações sobre incertezas para todas as variáveis com resoluções espaciais e temporais reduzidas (HERSBACH, DEE, 2016; HOFFMANN et al., 2019).

Já o MERRA-2 foi criado para melhorar as reanálises do MERRA e ter uma análise climática contínua até a atualidade. Seu método de assimilação é o 3D-VAR com um ciclo de atualização de 6 horas e 72 níveis ETA híbrido da superfície até 0,01 hPa. Ela inclui a assimilação de dados de aerossóis, proporcionando assim uma reanálise multidecadal na qual as observações de aerossóis e meteorológicas são assimiladas conjuntamente dentro de um sistema global de assimilação de dados. Em comparação com o MERRA, as principais melhorias são a inclusão de novos dados observados, modificações do modelo atmosférico, melhorias na hidrologia da superfície terrestre, substituindo a precipitação gerada pelo modelo por precipitação corrigida (REICHLE; LIU, 2014; KOSTER et al., 2016; GELARO et al., 2017)

Apesar de possuir resolução reduzida, a reanálise tem sido bastante conveniente na análise de climatologia, uma vez que fornece estimativas em uma grade regular por um longo e contínuo período, resolvendo o problema de séries temporais históricas inconsistentes e falhas, provenientes das insuficientes estações meteorológicas esparsas pelo globo (KISTLER et al., 2001). Reanálises de temperatura média diária e mensal têm mostrado resultados satisfatórios comparados aos dados de estações, porém quanto às reanálises de precipitação, ressalta-se cautela na sua utilização, uma vez que a precipitação observada não é considerada como *input* durante o processo de assimilação dos dados (ZHANG et al., 2011).

Assim, para aumentar a confiabilidade dos resultados, neste estudo foram utilizados dados diários de precipitação obtidos do CHIRPS para o cálculo dos índices extremos. Esses dados possuem resolução espacial de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ e cobrem a área de 50°N - 50°S . Combinando imagens de satélites e dados de estações *in situ*, o CHIRPS foi criado em colaboração com cientistas do *Earth Resources Observation and Science* (EROS) pertencente ao *United States Geological Survey* (USGS) e possui séries temporais de chuva para análise de tendências e monitoramento sazonal de secas

(FUNK et al., 2015). Tanto as reanálises do ERA-5 e MERRA-2 quanto as observações do CHIRPS abrangem o período entre 1981-2010.

3.3 Métodos

3.3.1 Índices extremos

A partir das médias diárias dos dados dos MCGAs do HELIX, das reanálises do ERA-5 e MERRA-2 e das observações do CHIRPS, foram calculados estatisticamente os índices extremos climáticos (Tabela 3.2) utilizando o ClimPACT2, o qual é uma versão atualizada e semelhante ao RCLimdex (ZHANG et al., 2011; ALEXANDER; HEROLD, 2016). Esses índices são anuais e baseados em percentis, acumulados e duração do evento, e alguns deles foram também utilizados por Frich et al. (2002), Sillmann et al. (2013 a, b), Natividade et al. (2017), Gouveia et al. (2022), Avila-Diaz et al. (2020), Marengo et al. (2021), Avila-Diaz et al. (2023), porém fazendo uso de distintas bases de dados.

Tabela 3.2 - Índices extremos climáticos anuais de precipitação e temperatura.

Sigla	Índice	Unidade	Descrição
CDD	<i>Dias secos consecutivos</i>	dias	Número máximo de dias consecutivos do ano com precipitação diária inferior a 1 mm
R10mm	<i>Dias de precipitação intensa acima de 10mm</i>	dias	Número de dias no ano em que a precipitação diária foi superior a 10 mm
R30mm	<i>Dias de precipitação intensa acima de 30mm</i>	dias	Número de dias no ano em que a precipitação diária foi superior a 30 mm
R95p	<i>Dias muito úmidos</i>	mm	Precipitação anual total acima do 95º percentil da distribuição de precipitação diária do período 1981-2010
Rx5Day	<i>Máximo de precipitação em 5 dias</i>	mm	Precipitação total máxima acumulada em 5 dias consecutivos
TN10p	<i>Noites muito frias</i>	%	Porcentagem de dias no ano em que a temperatura mínima está abaixo do 10º percentil da distribuição de temperatura diária do período 1981-2010
TN90p	<i>Noites muito quentes</i>	%	Porcentagem de dias no ano em que a temperatura mínima está acima do 90º percentil da distribuição de temperatura diária do período 1981-2010
TX10p	<i>Dias muito frios</i>	%	Porcentagem de dias no ano em que a temperatura máxima está abaixo do 10º percentil da distribuição de temperatura diária do período 1981-2010
TX90p	<i>Dias muito quentes</i>	%	Porcentagem de dias no ano em que a temperatura máxima está acima do 90º percentil da distribuição de temperatura diária do período 1981-2010
WSDI	<i>Duração de ondas de calor</i>	dias	Período anual em que pelo menos seis dias consecutivos de temperatura máxima está acima do 90º percentil da distribuição de temperatura diária entre 1981-2010

3.3.2 Interpolação e *ensemble* multimodelos

As cinco bases de dados utilizadas possuem resoluções espaciais distintas, fazendo-se necessário uma interpolação. Assim, utilizou-se a **Interpolação Conservativa** de 1ª ordem para transformar as grades originais de cada base de dados em uma resolução espacial padrão, aqui determinada como sendo 0,556° x 0,833° de latitude/longitude. Essa grade é a mesma do modelo HadGEM3 e foi escolhida por ter o maior espaçamento entre os pontos de grade dentre todos os dados, uma vez que é mais adequado a diminuição de resolução espacial ao invés do seu aumento, para não comprometer a acurácia do novo conjunto de dados gerado. Este método assume que os valores do campo de origem são fluxos definidos nas células da grade de origem. Para

cada novo pixel, este método de interpolação considera todas as células de grade originais que estão sobrepostas a ele, e com base nessa área de sobreposição entre a grade de origem e de destino, o novo campo é calculado (JONES, 1999).

Uma abordagem comum para sintetizar o resultado das inúmeras etapas de uma projeção climática e explorar suas incertezas é calcular a média aritmética simples dos modelos, onde a cada membro é atribuída igual probabilidade de ocorrência. Essa técnica, denominada **Ensemble Multimodelos** (do inglês, MME), tem sido bastante utilizada e os resultados mostram maior concordância com as observações do que quando analisado cada conjunto individualmente (KNUTTI et al., 2010; CHEN et al., 2014; TINKER et al., 2016; BETTS et al., 2018). Assim, foram gerados *ensembles* individuais dos MCGAs HadGEM3 e EC-EARTH3, e um *ensemble* de ambos em conjunto, considerando os diferentes MCGs do CMIP5 utilizados como forçantes em cada um deles, tanto para as simulações quanto para as projeções climáticas.

3.3.3 Avaliação dos modelos do HELIX

O processo de avaliação dos modelos iniciou-se realizando uma comparação espacial entre as observações (e reanálises) e as simulações das 13 rodadas dos MCGAs do HELIX sobre toda a América do Sul para o período 1981-2010, a fim de verificar a consistência dos modelos individuais e de seus *ensembles*. Como ferramenta para auxiliar na avaliação dos modelos, foram utilizados indicadores estatísticos, como o **Viés**, o qual é dado pela diferença entre a simulação e a observação.

$$\text{Viés} = \text{Simulação} - \text{Observação} \quad (3.1)$$

Alguns métodos de remoção de viés, como *Bias Correction* (HAERTER et al., 2011) e *Delta Change* (GELLENS, ROULIN, 1998), têm sido utilizados em estudos de mudanças climáticas para eliminar os vieses das simulações e gerar séries corrigidas no futuro (VOUSDOUKAS et al., 2016; DOSIO, 2016; DOSIO, FISCHER, 2018). Porém, objetivando garantir os princípios de conservação e consistência física entre as variáveis, excluir a tendência de aumento da intensidade em extremos de precipitação induzidas pela correção de viés, além de analisar a incerteza das projeções, optou-se por não utilizá-la. Dessa maneira, considera-se importante avaliar as mudanças das projeções por meio dos dados de saída sem manipulação, representando assim o

comportamento do próprio modelo e as incertezas associadas a ele (BETTS et al., 2018; NAUMANN et al., 2018).

Para verificar o nível de significância das simulações para cada índice extremo, utilizou-se o **Teste-t de Student** (SPIEGEL, 1993). Esse teste de hipótese utiliza conceitos estatísticos para não rejeitar ou rejeitar a hipótese de igualdade das médias entre duas amostras com distribuição normal (Gaussiana), e é dado por:

$$t = \frac{\overline{x_{sim}} - \overline{x_{obs}}}{\sigma_{\overline{x_{sim}} - \overline{x_{obs}}}} \quad (3.2)$$

onde

$$\sigma_{\overline{x_{sim}} - \overline{x_{obs}}} = \frac{(n_{sim}-1)\sigma_{sim}^2 + (n_{obs}-1)\sigma_{obs}^2}{(n_{sim}+n_{obs}-2)} \quad (3.3)$$

$\overline{x_{sim}}$ é a média das simulações e $\overline{x_{obs}}$ é a média das observações, ambas para 1981-2010, $\sigma_{\overline{x_{sim}} - \overline{x_{obs}}}$ é o desvio padrão entre as séries, n_{sim} e n_{obs} correspondem ao número de anos de cada uma das séries (30 anos), σ_{sim}^2 e σ_{obs}^2 são as variâncias. Essa métrica foi aplicada para os índices extremos de cada modelo individual e para a média entre eles, com (n-1) graus de liberdade e nível de confiança de 95%.

Também, por meio das métricas desvio padrão (σ), correlação de Pearson (r) e raiz do erro médio quadrático (RMSE), gerou-se o **Diagrama de Taylor** (TAYLOR, 2001), com a finalidade de sintetizar e facilitar a verificação do desempenho dos modelos em representar os padrões médios climatológicos dos extremos em cada uma das três sub-regiões: AMZ, NEB e S/SEB. Ele é dado por um diagrama polar no qual são representadas as métricas: RMSE nos eixos x e y, r no ângulo de inclinação e σ por linhas com origem no zero (ponto de referência).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (f_n - r_n)^2} \quad (3.4)$$

$$r = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (f_n - \bar{f})(r_n - \bar{r})}{\sigma_f \sigma_r} \quad (3.5)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (3.6)$$

A relação dessas estatísticas é dada por:

$$RMSE^2 = \sigma_s^2 + \sigma_o^2 - 2\sigma_s\sigma_or \quad (3.7)$$

onde s representa a simulação e o simboliza a observação. A construção do diagrama é baseada na similaridade dessa equação com a Lei dos Cossenos.

3.3.4 Projeções e mudanças da variável climática

As projeções para o século XXI foram agrupadas de acordo com o período de 20 anos em torno da data em que a média móvel da TMG atinge determinado SWL, totalizando 3 períodos (SWL 1.5, SWL 2.0, SWL 4.0). Inicialmente, a análise das projeções foi feita através da **mudança** da variável climática, chamada também de anomalia, a qual resulta da diferença entre os valores médios do futuro e das simulações do presente (1981-2010), tanto para os *ensembles* de cada modelo como para o *ensemble* de todas as rodadas. Tal análise possibilita averiguar como será o comportamento dos índices no futuro sobre toda a América do Sul para cada SWL, além de permitir comparações entre os três níveis de aquecimento, mostrando qual será o avanço dos extremos ao longo do século XXI.

A significância estatística da mudança de cada índice, com base nas rodadas dos MCGAs, foi verificada através do **Teste-*t* de Student** para duas amostras (SPIEGEL, 1993), as quais correspondem ao período de referência (1981-2010) e a cada SWL (1,5 °C, 2 °C ou 4 °C), com (n-1) graus de liberdade e nível de confiança de 95%.

Adicionalmente, fez-se a **classificação da mudança** com base na metodologia proposta por Tebaldi et al. (2011) e utilizada por Dosio e Fischer (2018):

(i) A mudança é considerada robusta se mais de 50% das rodadas dos MCGAs mostraram significância estatística da mudança e, simultaneamente, mais de 80% deles concordaram em sinal;

(ii) A mudança é considerada incerta, ou não confiável, se mais de 50% das rodadas dos MCGAs mostraram significância estatística da mudança, porém menos de 80% deles concordaram em sinal;

(iii) A mudança é considerada não-significativa se mais de 80% das rodadas dos MCGAs mostram-se não significativas, independentemente da concordância em sinal, indicando as áreas onde a mudança dos índices nas projeções da maioria dos modelos é robusta, porém pequena (ou nula) em comparação com a variabilidade.

Em relação às sub-regiões, calcularam-se **funções densidade de probabilidade** (PDFs) para cada rodada dos modelos em todos SWLs, por meio da contagem do número de pontos de grade ponderados pela latitude que estão contidos em cada domínio das sub-regiões. A normalização dos resultados em relação ao desvio padrão da série temporal ao longo do período de referência (1981-2010) foi realizada, a fim de representar quantas vezes maior que a variabilidade interanual será o índice extremo (ex. 2σ =dobro do aumento).

3.3.5 Incertezas das projeções

Posteriormente, avaliou-se as incertezas das projeções, quantificando e identificando quais as fontes de maior contribuição no total de incertezas nos índices extremos, principalmente sobre as sub-regiões de interesse. Neste estudo, não foram analisadas as incertezas referentes aos cenários futuros. Assim, as duas diferentes fontes analisadas foram:

- (i) variabilidade interna: relacionada à característica caótica do Sistema Climático, o qual pode apresentar variações internas complexas imprevisíveis, sobreposta à tendência de longo prazo de cada projeção;
- (ii) incerteza do modelo: referente às configurações, resolução da grade, escolha das parametrizações utilizadas, algoritmos numéricos. Utilizando a mesma forçante radiativa, diferentes modelos produzem projeções de mudança distintas, ou mesmo, parâmetros distintos dentro de um modelo individual podem gerar rodadas com projeções diferentes uma da outra.

A metodologia utilizada nesse estudo para estimar as duas componentes de incertezas foi proposta por Hawkins e Sutton (2009) e também utilizada por Blazquez e Nuñez (2013) e Chen et al. (2014). Inicialmente, para cada índice extremo, as projeções foram ajustadas pelo Método dos Mínimos Quadrados (MMQ), utilizando polinômios de 4ª ordem sobre todo o período de estudo, desde 1971 até o final das projeções de cada rodada dos modelos. A análise polinomial serve para minimizar a soma das distâncias entre os pontos da variável à curva de ajuste. Assim, as projeções brutas X para cada modelo m e tempo t podem ser escritas como:

$$X_{m,t} = x_{m,t} + \varepsilon_{m,t} \quad (3.8)$$

onde x é o ajuste suave e ε corresponde ao resíduo (variabilidade interna). A referência é dada pela média entre 1981 e 2010 para cada índice extremo, utilizando os dados ajustados.

Para diminuir a contribuição dos modelos que apresentarem valores muito discrepantes às observações, utilizou-se uma ponderação pela sua capacidade em simular a média dos índices entre 1981-2010. A cada modelo é dado um peso:

$$p_m = \frac{1}{x_{obs} + |x_{m,2010} - x_{obs}|} \quad (3.9)$$

onde $x_{m,2010}$ é a mudança média do índice no ano de 2010, relativo ao período 1981-2010, para cada modelo, e x_{obs} é a estimativa observacional derivada do ajuste de um polinômio similar para as observações. Também, esses ponderamentos podem ser expressos como quantidades normalizadas, dadas por:

$$P_m = \frac{p_m}{\sum_m p_m} \quad (3.10)$$

Existem metodologias de ponderação mais complexas, como REA apresentado por Giorgi e Mearns (2002), porém optou-se manter essa metodologia simples, principalmente porque a ponderação não afeta fortemente os resultados. Após os ajustes e ponderamentos das rodadas dos modelos, o cálculo de cada componente das incertezas das projeções foi realizado.

A **variabilidade interna** de cada modelo foi definida como a variância dos resíduos dos ajustes (var_t), estimados independentemente do período e dos níveis de aquecimento. Primeiramente, calculou-se a média residual de cada modelo e nível de aquecimento. Em seguida, a variância entre os três SWLs e, por fim, a média multimodelo dessas variâncias após ponderação é considerada a componente da variabilidade interna:

$$V_i = \sum_m P_m var_t(\varepsilon_{m,t}) \quad (3.11)$$

Embora a variabilidade interna possa sofrer possíveis mudanças no futuro (MEEHL et al., 2007; SOLOMON et al., 2007), assume-se V_i como sendo constante ao longo do século XXI.

A componente de **incerteza do modelo** para cada SWL foi estimada através da variância ponderada entre as projeções suavizadas das diferentes rodadas dos modelos (var_m^P) :

$$V_m(t) = var_m^P(x_{m,t}) = \frac{\sum_m P_m [A_m(t) - M(t)]^2}{N} \quad (3.12)$$

onde $A_m(t)$ é a anomalia das projeções ajustadas, relativa à média entre 1981-2010, para cada rodada e nível de aquecimento, $M(t)$ é a média das anomalias das rodadas e N é o número de rodadas.

Assim, assumindo-se que não há interação entre as duas componentes de incertezas das projeções, ou seja, que cada uma delas pode ser considerada independente, a incerteza total V_T é dada por:

$$V_T(t) = V_i + V_m(t) \quad (3.13)$$

Com base nas análises de incertezas, também estimou-se a confiabilidade das projeções para as mudanças climáticas. Essa **confiabilidade** foi obtida através da Relação Sinal-Ruído (*signal-to-noise ratio*), dada por:

$$S/R(t) = \frac{\Delta x(t)}{V_T(t)} \quad (3.14)$$

onde $\Delta x(t)$ é o sinal da mudança climática, dada pela diferença entre um período do futuro e a média entre 1981-2010 para os *ensembles* dos modelos. Estudos anteriores (BLÁSQUEZ, NUÑEZ, 2013) utilizaram o desvio padrão da incerteza total para representar o ruído, porém uma superestimativa dos valores de S/R foi encontrada. Por esse motivo, como utilizado por Hawkins e Sutton (2009) e Chen et al. (2014), optou-se por utilizar V_T ao invés de seu desvio padrão.

A seguir, os resultados foram apresentados em 3 partes: Avaliação dos modelos (Seção 4), Projeções e mudanças da variável climática (Seção 5) e Incertezas das projeções (Seção 6).

4 AVALIAÇÃO DOS MODELOS

Primeiramente, os modelos foram avaliados quanto a capacidade em simular a climatologia observada dos índices extremos de precipitação e temperatura sobre a América do Sul, obtida através dos dados observados de precipitação do CHIRPS e das reanálises das temperaturas máxima e mínima do ERA-5 e MERRA-2, referentes ao período 1981-2010.

Os resultados das simulações individuais (Apêndice A) das rodadas do EC-EARTH3-HR mostram-se semelhantes entre si em magnitude e região abrangente para cada índice extremo de temperatura e precipitação, assim como ocorre entre as rodadas do HadGEM3, onde apenas o modelo GFDL-ESM2 apresenta disparidades positivas em relação aos demais. Porém, quando comparadas as rodadas de um *ensemble* com o outro, as diferenças em magnitude e abrangência são consideráveis, e muitas das vezes divergentes em determinadas regiões, sendo os maiores valores de CDD, TN10p, TN90p, TX10p, TX90p simulados pelas rodadas do EC-EARTH3-HR, enquanto para HadGEM3, os maiores índices são obtidos para R30mm, R95p e Rx5Day. Assim, o EC-EARTH3-HR apresenta os menores vieses para a maioria dos extremos de precipitação e temperatura, quando comparados às observações do CHIRPS e as reanálises do ERA-5 e MERRA-2, salvo para os índices CDD, R30mm e WSDI obtido do MERRA-2, nos quais as simulações do HadGEM3 se aproximaram mais das médias climatológicas.

Para o índice dias secos consecutivos (CDD - Figura 4.1), os menores valores (< 30 dias) foram observados nos países do norte da América do Sul, oeste da Amazônia, Sul do Brasil, Uruguai e leste argentino, enquanto grandes quantidades de CDD foram identificadas em parte da região Andina e sobre a região central e Nordeste do Brasil, alcançando seu máximo (\approx 90 a 120 dias) no semiárido nordestino e norte do Chile (região de deserto). O semiárido do Nordeste historicamente possui clima seco (MARENGO; TORRES; ALVES, 2016); já a área central do Brasil, a qual engloba as regiões Centro-Oeste e Sudeste, está sob influência do Sistema de Monção da América do Sul, o qual caracteriza-se por inverno seco e verão chuvoso (ZHOU; LAU, 1998; GAN; KOUSKY; ROPELEWSKI, 2004; GRIMM; VERA; MECHOSO, 2005; GARCIA; KAYANO, 2009; MARENGO et al., 2012), podendo a grande quantidade de dias secos estar associada à ele (faz-se necessário análise sazonal da precipitação para averiguar relação). Analisando as simulações, nota-se que há maior magnitude e

extensão de área de CDD para os *ensembles* dos modelos, sendo maiores que o observado no *ensemble* EC-EARTH3-HR (Figura 4.1) e menores no *ensemble* HadGEM3 (Figura 4.2). Assim, vieses positivos são encontrados em grande parte do Brasil para o *ensemble* EARTH3-HR, ultrapassando a superestimativa de 70 dias de estiagem sobre parte das regiões Norte, Nordeste, Centro-Oeste e Sudeste do país, enquanto apresenta subestimativas entre 10 e 50 dias sobre a região Andina. Já para o *ensemble* HadGEM3, as subestimativas alcançam 50 dias no semiárido e nos Andes, apresentando também suaves superestimativas apenas no norte do país (até 30 dias).

Analisando o índice dias de precipitação intensa acima de 10 mm (R10mm), as observações mostram grandes valores na faixa NW-SE do continente, alcançando 90 dias na região Amazônica e países adjacentes e entre 50 e 70 dias em parte das regiões Centro-Oeste e Sudeste e no Sul do Brasil. Esse comportamento pode estar associado à Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), a qual é responsável por grandes quantidades de precipitação no verão sobre a faixa que se estende da Amazônia até o Sudeste (QUADRO, 1994). Os menores valores (< 30 dias) foram observados sobre a porção leste do NE e grande parte da Argentina, Chile, Paraguai e Bolívia. As simulações apresentam menores quantidades de R10mm, mas ainda conseguem representar as regiões com maiores valores observados, principalmente para o *ensemble* EC-EARTH3-HR, sendo as subestimativas superiores a 35 dias na porção norte da América do Sul e as superestimativas também ultrapassando os 35 dias na região da Cordilheira dos Andes. Além disso, as subestimativas no norte do continente se estenderam por parte da Amazônia no *ensemble* HadGEM3 e superestimativas no Nordeste, Centro-Oeste e Sudeste do Brasil também para o *ensemble* HELIX.

Já para dias de precipitação intensa acima de 30 mm (R30mm), observa-se maiores valores na região equatorial e no sul do Brasil, atingindo 20 dias. As simulações mostram valores abaixo de 5 dias para o *ensemble* EC-EARTH3-HR sobre todo o continente, exceto no sul do Brasil e Paraguai, onde alcança 15 dias, se estendendo também por parte do sudeste brasileiro, Bolívia para o *ensemble* HadGEM3. Assim, os modelos EC-EARTH3-HR subestimam sobre quase todo o Brasil (3-9 dias), região amazônica (9-15 dias), chegando a 15-21 dias de diferença no norte da AS; e superestimam suavemente sobre os Andes (3-9 dias). Já os modelos do HadGEM3 mostram vieses semelhantes sobre o norte da AS, porém as diferenças são positivas sobre o restante do continente, com superestimativas entre 3 e 9 dias sobre região

central, Sudeste e Sul do Brasil, Paraguai, norte argentino, atingindo 9-25 dias sobre parte da Bolívia.

Para dias muito úmidos (R95p), as observações indicam sobre a maior parte do Brasil 225-290 mm, os maiores valores sobre a porção oeste da Amazônia (290-420 mm) e norte do continente, alcançando 615 mm no leste do Equador e sul da Colômbia. A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), caracterizada pela convergência dos ventos alísios e pela temperatura da superfície do mar elevada nas regiões oceânicas adjacentes, forma uma banda convectiva na região equatorial e pode ser responsável pelo potencial de precipitação nessa faixa (UVO, 1989). As rodadas do EC-EARTH3-HR representam bem sobre o NEB do Brasil, porém subestimativas acima de 100 mm são mostradas sobre a Amazônia e norte da AS, enquanto superestimativas podem ser vistas sobre a Cordilheira dos Andes (> 100 mm), regiões adjacentes (20-60 mm) e Sul do Brasil. Para o ensemble HadGEM3, vieses negativos são encontrados no norte do continente e vieses positivos sobre o restante do território, ultrapassando 140 mm sobre o Centro-Oeste (CO), S/SEB, norte da Argentina, Uruguai, Paraguai, Bolívia e Peru.

Para máximo de precipitação em 5 dias (Rx5Day), as observações estão entre 80 e 100 mm na maior parte do continente. Os menores valores são encontrados na região dos Andes e oeste argentino (< 60 mm), enquanto os maiores estão sobre a região equatorial (160-200 mm) e na banda NW-SE sobre o Brasil (120-140 mm), chegando a 160 mm em Minas Gerais, Sul do Brasil e norte do Uruguai. Esse total pluviométrico em 5 dias na faixa equatorial pode ser também resultante da ZCIT, e o acumulado de chuva nas regiões CO e S/SEB pode estar sob influência da ZCAS e dos sistemas frontais (mais restringida ao S/SEB), os quais muitas vezes ocasionam precipitação severa e consequentes episódios de desastres naturais, como deslizamentos de terra, alagamentos e enchentes (QUADRO, 1994; ALVARENGA, 2012; SATYAMURTY; MATTOS, 1989; REBOITA; AMBRIZZI; DA ROCHA, 2009).

O ensemble EC-EARTH3-HR consegue simular Rx5Day para as regiões SE e S, porém com menor magnitude, mostrando subestimativas sobre todo o Brasil, mais fortemente na região equatorial (>50 mm) e AMZ (30-50 mm), e superestimativas na região Andina e países adjacentes. Já o ensemble HadGEM3 simula a linha NW-SE, mas com intensidade aumentada, sendo as superestimativas também sobre todo o território, ultrapassando 70 mm no SE, CE, S do Brasil, Paraguai, Bolívia, Cordilheira dos Andes,

com exceção da região das Guianas e parte da AMZ e Maranhão, onde houveram subestimativas entre 10 e 70 mm.

Figura 4.1 - Climatologia média anual observada (superior), simulada (central) e viés associado (inferior) dos índices extremos de precipitação, resultantes, respectivamente, dos dados do CHIRPS, da média dos modelos do EC-EARTH3-HR e da diferença entre ambos (simulado menos observado), referentes ao período de 1981 a 2010. As áreas hachuradas correspondem a vieses significativos estatisticamente. As unidades estão em *dias* para os índices CDD (a, f, k), R10mm (b, g, l) e R30mm (c, h, m), e em *mm* para os índices R95p (d, i, n) e Rx5Day (e, j, o).

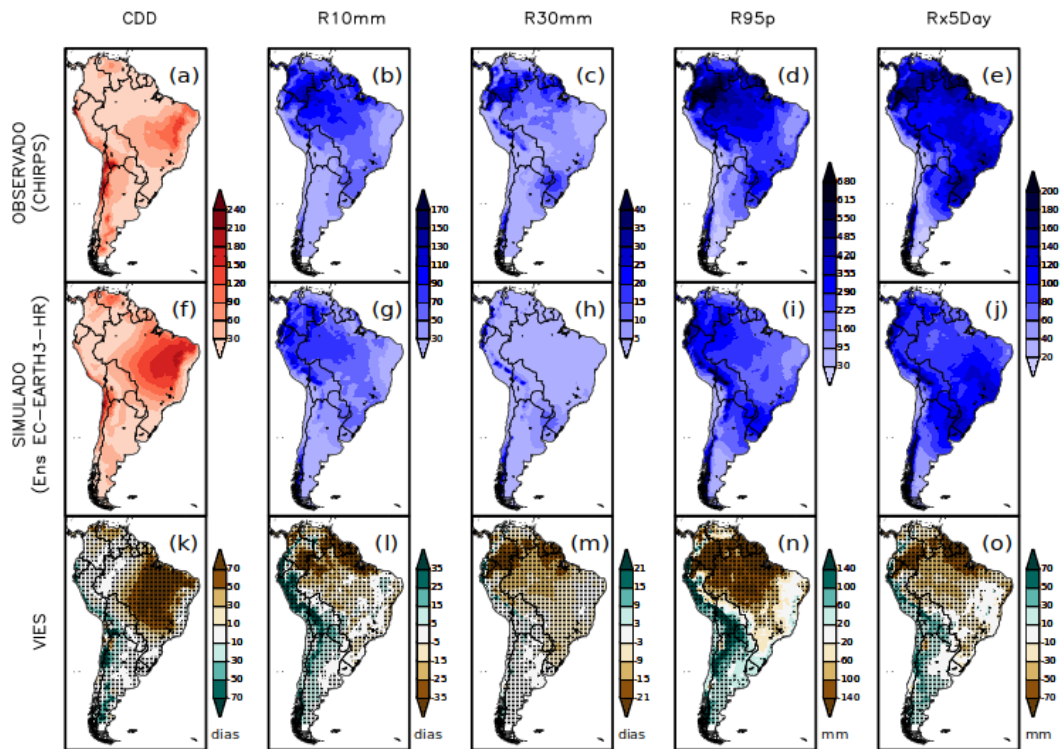


Figura 4.2 - Climatologia média anual observada (superior), simulada (central) e viés associado (inferior) dos índices extremos de precipitação, resultantes, respectivamente, dos dados do CHIRPS, da média dos modelos do HadGEM3 e da diferença entre ambos (simulado menos observado), referentes ao período de 1981 a 2010. As áreas hachuradas correspondem a vieses significativos estatisticamente. As unidades estão em *dias* para os índices CDD (*a, f, k*), R10mm (*b, g, l*) e R30mm (*c, h, m*), e em *mm* para os índices R95p (*d, i, n*) e Rx5Day (*e, j, o*).

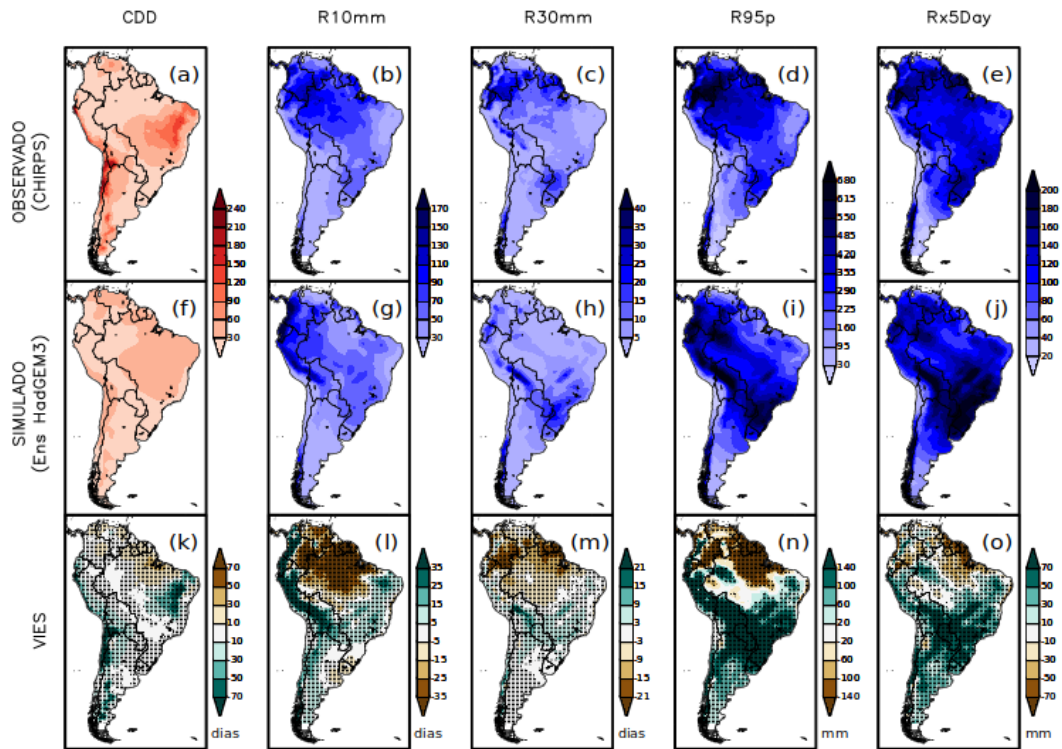
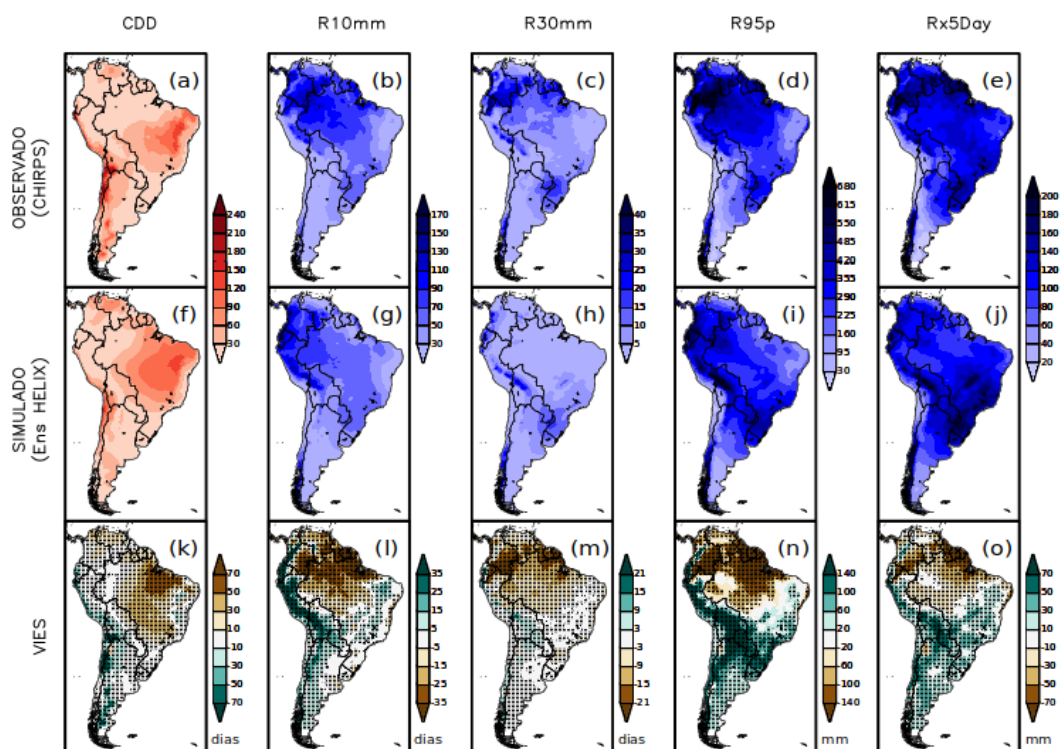


Figura 4.3 - Climatologia média anual observada (superior), simulada (central) e viés associado (inferior) dos índices extremos de precipitação, resultantes, respectivamente, dos dados do CHIRPS, da média dos modelos do HELIX e da diferença entre ambos (simulado menos observado), referentes ao período de 1981 a 2010. As áreas hachuradas correspondem a vieses significativos estatisticamente. As unidades estão em *dias* para os índices CDD (a, f, k), R10mm (b, g, l) e R30mm (c, h, m), e em *mm* para os índices R95p (d, i, n) e Rx5Day (e, j, o).



Quando analisados os índices de temperatura, as porcentagens são pequenas e os vieses, menores ainda, porém apresentam significativa diferença em determinadas regiões. O ERA-5 (Figura 4.4) mostra as maiores porcentagens de TN10p e TX10p sobre as regiões NE, SE e Andina, chegando a 10,9% no semiárido nordestino; enquanto os menores valores são encontrados no oeste do Brasil e sul da AS ($\approx 10,3\%$). Para TN90p e TX90p, destacam-se valores acima de 10,6% em todo o Brasil, chegando em 10,9% na porção norte do país; e WSDI maiores ao norte da AS (15-18 dias) e central do Brasil (12-15 dias), diminuindo com o aumento de latitude. De maneira geral, o ensemble EC-EARTH3-HR (Figura 4.4) simula valores abaixo da reanálise ERA-5 para todos os extremos de temperatura, evidenciando assim vieses negativos ($> 0,14\%$) de TN10p sobre o NE, parte do SE, Cordilheira dos Andes e Argentina; e vieses positivos

sobre parte da região amazônica e Peru, ultrapassando 0,14% também. Para TN90p, as simulações mostram maiores porcentagens na região tropical, decrescendo em direção ao sul do continente, resultando em subestimativas maiores sobre o NE, SE e Andes, e uma pequena área de superestimativas entre o oeste da AMZ, Peru e Equador. Nas regiões NEB, SE e CO do Brasil, as simulações de TX10p e TX90p apresentam os maiores valores, alcançando 10,8%, e as subestimativas ($> 0,14\%$) estão mais evidenciadas na região equatorial em ambos os índices. Já para WSDI, os modelos do EC-EARTH3-HR colocam sobre a região central do Brasil os maiores valores (9-12 dias), chegando a 15 dias entre MG e GO, sendo as superestimativas (3-5 dias) sobre essa área, e as subestimativas (1-7 dias) mais concentradas entre os trópicos e na região dos Andes.

Quando comparada a reanálise do ERA-5 com as simulações do ensemble HadGEM3 (Figura 4.5), nota-se maiores subestimativas espalhadas por todo o território, ultrapassando 0,14% para TN10p, TN90p, TX10p, TX90p, e uma área de subestimativas menos pronunciadas sobre o oeste da AMZ e parte do Peru, se estendendo ao leste da AMZ para TX10p e também às regiões CE e trecho do SE para TX90p. Porém, não foram significativos os vieses para nenhum desses 4 índices de temperatura. Enquanto para WSDI, as áreas com vieses positivos (3-7 dias) compreendem a faixa NW-SE da AS (significativo apenas em uma pequena área no norte do Peru), e com vieses negativos em parte do NE brasileiro, norte da AS e Cordilheira dos Andes.

Figura 4.4 - Climatologia média anual observada (superior), simulada (central) e viés associado (inferior) dos índices extremos de temperatura, resultantes, respectivamente, dos dados do ERA-5, da média dos modelos do EC-EARTH3-HR e da diferença entre ambos (simulado menos observado), referentes ao período de 1981 a 2010. As áreas hachuradas correspondem a vieses significativos estatisticamente. As unidades estão em % para os índices TN10p (a, f, k), TN90p (b, g, l), TX10p (c, h, m) e TX90p (d, i, n), e em dias para o índice WSDI (e, j, o).

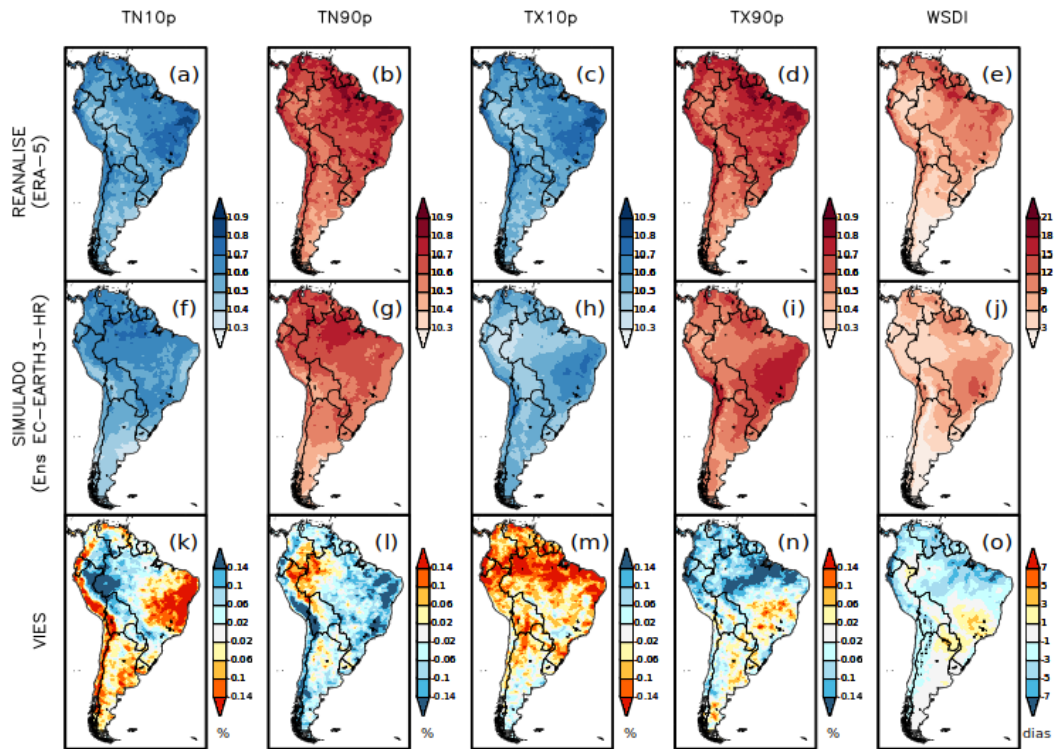


Figura 4.5 - Climatologia média anual observada (superior), simulada (central) e viés associado (inferior) dos índices extremos de temperatura, resultantes, respectivamente, dos dados do ERA-5, da média dos modelos do HadGEM3 e da diferença entre ambos (simulado menos observado), referentes ao período de 1981 a 2010. As áreas hachuradas correspondem a vieses significativos estatisticamente. As unidades estão em % para os índices TN10p (a, f, k), TN90p (b, g, l), TX10p (c, h, m) e TX90p (d, i, n), e em dias para o índice WSDI (e, j, o).

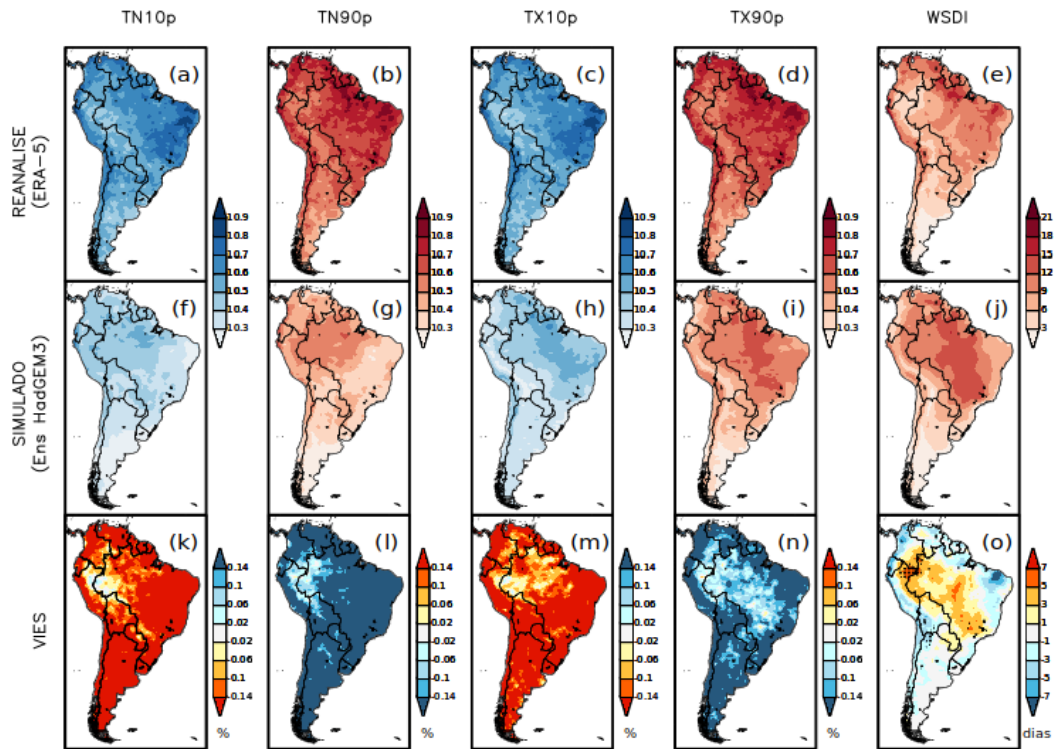
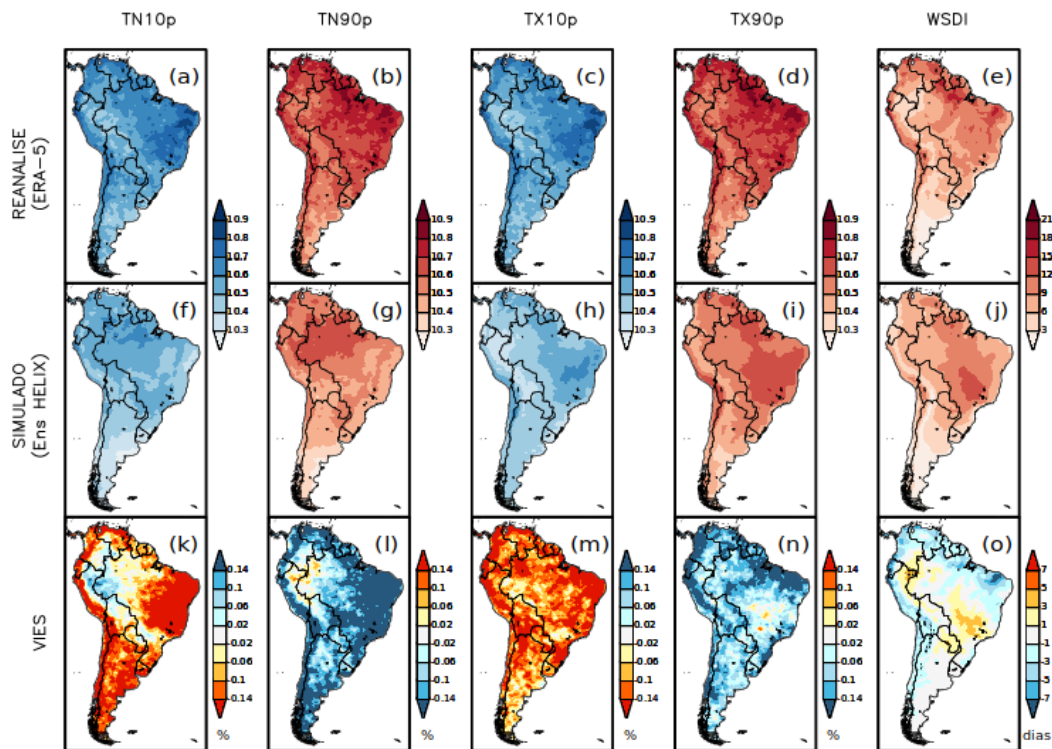


Figura 4.6 - Climatologia média anual observada (superior), simulada (central) e viés associado (inferior) dos índices extremos de temperatura, resultantes, respectivamente, dos dados do ERA-5, da média dos modelos do HELIX e da diferença entre ambos (simulado menos observado), referentes ao período de 1981 a 2010. As áreas hachuradas correspondem a vieses significativos estatisticamente. As unidades estão em % para os índices TN10p (a, f, k), TN90p (b, g, l), TX10p (c, h, m) e TX90p (d, i, n), e em dias para o índice WSDI (e, j, o).



O comportamento dos índices de temperatura na reanálise MERRA-2 (Figura 4.7) é semelhante ao ERA-5, exceto por apresentar magnitudes menores em TN10p e TN90p, restringir mais ao NEB a região de maiores porcentagens de TX10p e maior WSDI para grande parte do Brasil. Comparado ao ensemble EC-EARTH3-HR (Figura 4.7), as regiões de maiores vieses ($> 0,14\%$) se concentram na AMZ e países adjacentes para TN10p e TN90p; faixa NW-SE para TX10p; menores vieses (não-significativos) na porção norte da AS para TX90p ($> 0,06\%$) e na região equatorial para WSDI (> 5 dias). Quando analisado em relação ao ensemble HadGEM3 (Figura 4.8), o sinal dos vieses é contrário para as regiões em TN10p e TN90p, observa-se subestimativas de TX10p e TX90p para quase todo o território, exceto AMZ; e comportamento semelhante ao viés do Ens. HadGEM3 em relação ao ERA-5 para WSDI.

A região semiárida do Nordeste apresenta altas temperaturas ao longo do ano, enquanto as regiões Centro-Oeste e Sudeste são influenciadas pelo SMAS, o qual se caracteriza por verões quentes. Essa influência sazonal do SMAS pode ser uma explicação para as observações mais acentuadas dos extremos quentes, principalmente TX90p e WSDI (ZHOU; LAU, 1998; GARCIA; KAYANO, 2009).

Figura 4.7 - Climatologia média anual observada (superior), simulada (central) e viés associado (inferior) dos índices extremos de temperatura, resultantes, respectivamente, dos dados do MERRA-2, da média dos modelos do EC-EARTH3-HR e da diferença entre ambos (simulado menos observado), referentes ao período de 1981 a 2010. As áreas hachuradas correspondem a vieses significativos estatisticamente. As unidades estão em % para os índices TN10p (a, f, k), TN90p (b, g, l), TX10p (c, h, m) e TX90p (d, i, n), e em dias para o índice WSDI (e, j, o).

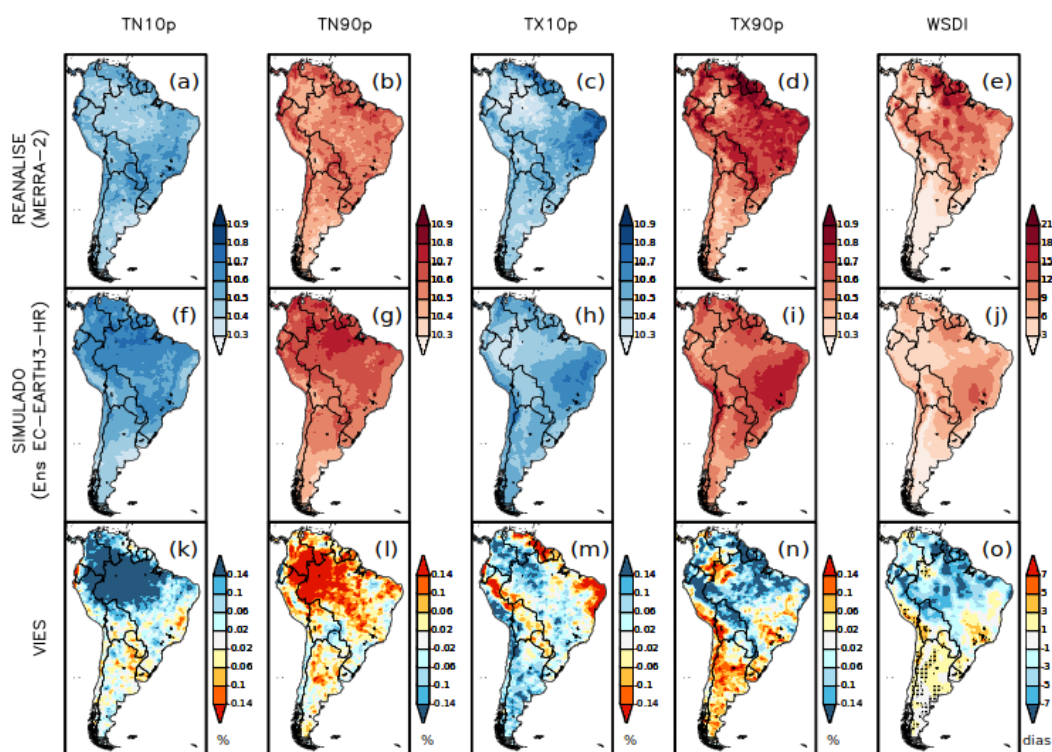


Figura 4.8 - Climatologia média anual observada (superior), simulada (central) e viés associado (inferior) dos índices extremos de temperatura, resultantes, respectivamente, dos dados do MERRA-2, da média dos modelos do HadGEM3 e da diferença entre ambos (simulado menos observado), referentes ao período de 1981 a 2010. As áreas hachuradas correspondem a vieses significativos estatisticamente. As unidades estão em % para os índices TN10p (a, f, k), TN90p (b, g, l), TX10p (c, h, m) e TX90p (d, i, n), e em dias para o índice WSDI (e, j, o).

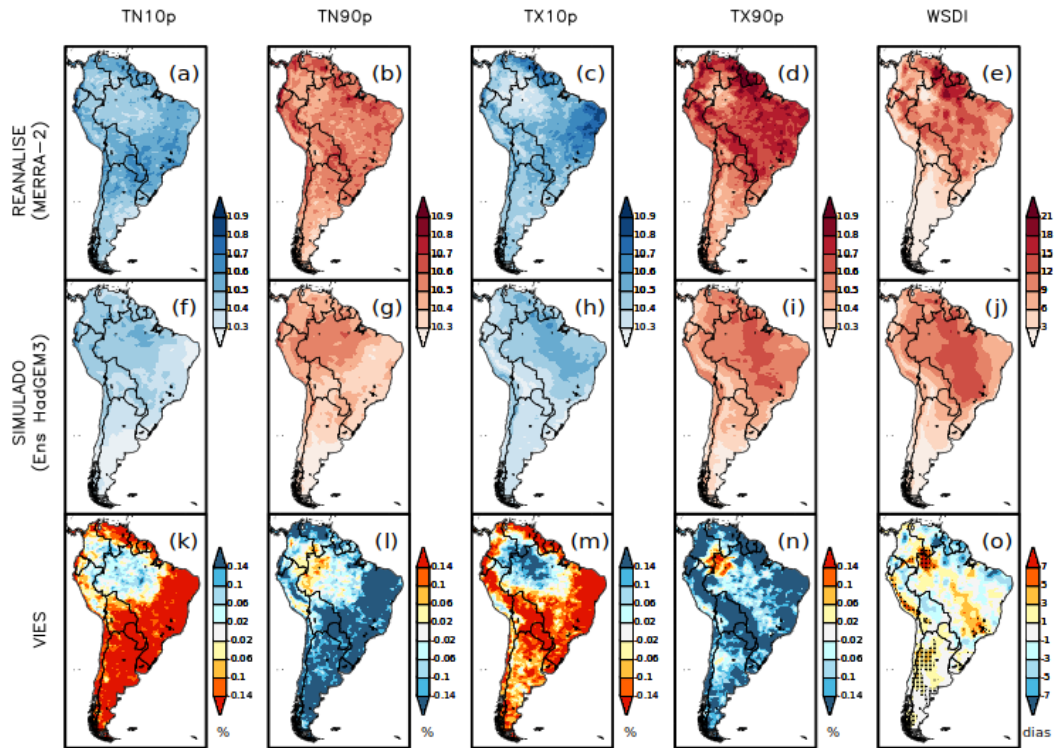
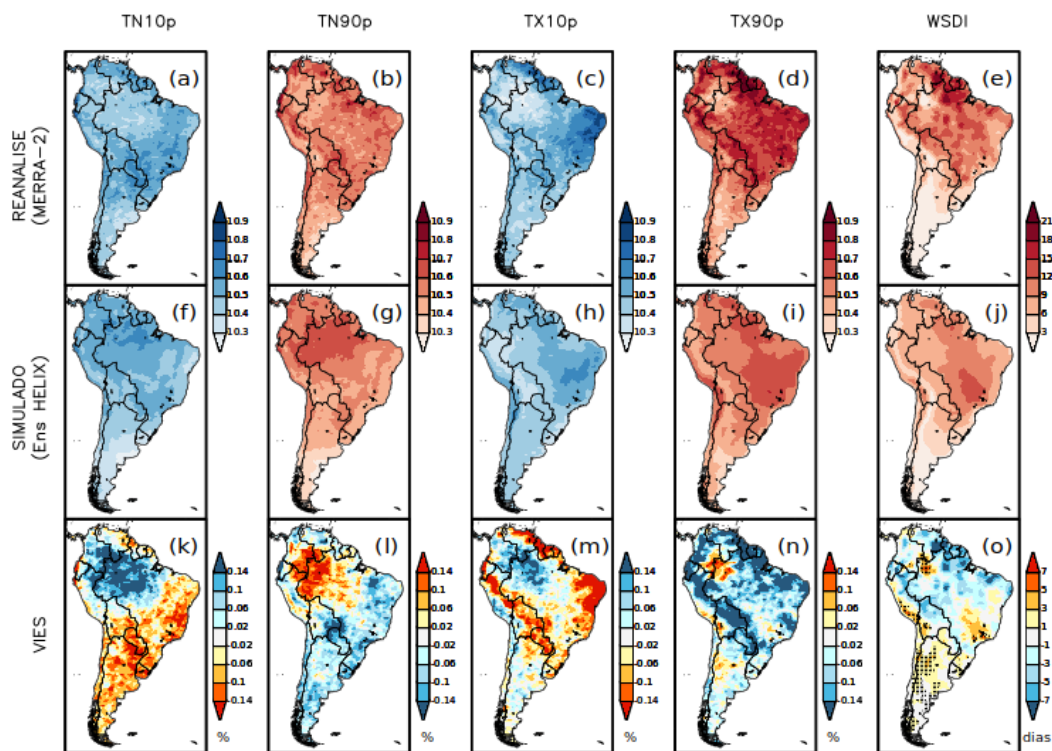


Figura 4.9 - Climatologia média anual observada (superior), simulada (central) e viés associado (inferior) dos índices extremos de temperatura, resultantes, respectivamente, dos dados do MERRA-2, da média dos modelos do HELIX e da diferença entre ambos (simulado menos observado), referentes ao período de 1981 a 2010. As áreas hachuradas correspondem a vieses significativos estatisticamente. As unidades estão em % para os índices TN10p (a, f e k), TN90p (b, g e l), TX10p (c, h e m) e TX90p (d, i e n), e em *dias* para o índice WSDI (e, j e o).



Quando analisadas as simulações do ensemble HELIX (Figuras 4.3, 4.6, 4.9), os valores dos índices são suavizados e os vieses diminuídos com a média entre HadGEM3 e EC-EARTH3-HR, uma vez que em várias áreas o comportamento era contrário ou com grande diferença de magnitude. É importante ressaltar que a maior parte das áreas de vieses, tanto positivos quanto negativos, para os *ensembles* dos índices de precipitação são significativos, ou seja, a diferença entre observado CHIRPS e simulado pelos modelos é grande e deve ser considerada, uma vez que os modelos mostram-se deficientes em simular satisfatoriamente as variáveis. Em contrapartida, os vieses dos índices de temperatura não apresentaram significância estatística, exceto para WSDI em uma ínfima área no norte do Peru quando comparada as simulações com a reanálise do ERA-5, e no noroeste da Amazônia, região da Cordilheira dos Andes e parte da Argentina quando essa comparação se deu em relação à reanálise do MERRA-2. Isto

indica que as simulações dos modelos representaram melhor os extremos de temperatura e conseguiram mostrar mais fidedignamente como cada índice se comportou climatologicamente.

Apesar desse comportamento distinto entre os modelos e variação dos valores de acordo com cada rodada, optou-se por não eliminar nenhuma delas, uma vez que comparativamente não houveram *outliers* em todos os índices extremos de um mesmo modelo forçante, sendo pontuais as maiores discrepâncias.

Complementarmente, a acurácia dos modelos em simular os padrões médios climatológicos de cada extremo de precipitação e temperatura foi obtida pelo Diagrama de Taylor, com base no desvio padrão (dispersão), na correlação de Pearson (associação) e no erro quadrático médio EQM (grau de ajuste), os quais são representados, respectivamente, por linhas circulares azuis, linhas pretas e linhas circulares verdes. O desvio padrão e a REMQ foram normalizados, a média da observação CHIRPS ou das reanálises ERA-5 e MERRA-2 é representada pelo quadrado verde na abscissa do gráfico e os círculos dentro do diagrama denotam as rodadas dos modelos EC-EARTH3-HR (azuis) e HadGEM3 (vermelhos). Essa análise foi feita para as 3 sub-regiões AMZ, NEB e S/SEB do Brasil, e refere-se ao período 1981-2010.

Todos os índices de precipitação (Figura 4.10) apresentam correlações tanto positivas quanto negativas nas 3 sub-regiões. Para CDD, as rodadas do HadGEM3 são mais convergentes e possuem os menores desvios quando comparados ao EC-EARTH3-HR, o qual apresenta maior dispersão. Porém, em ambos os modelos, as correlações são inferiores a 0,4, chegando próximo de 0,6 apenas em um modelo forçante. Na região AMZ, os pontos encontram-se mais próximos ao observado e os EQMs são menores, sendo melhor representado o índice CDD. Para R10mm e R95p, os modelos são mais dispersos entre si, mostram grandes desvios, altos valores de EQM e baixas correlações ($< 0,4$) com o observado CHIRPS. Já para R30mm e Rx5Day, as rodadas do EC-EARTH3-HR estão mais concentradas e próximas ao desvio nulo, principalmente para R30mm nas sub-regiões AMZ e NEB. Contudo, no geral, estes índices apresentaram altos EQMs e correlações abaixo de 0,5, evidenciando a baixa destreza dos modelos em simular as observações.

Quando analisados os índices de temperatura, observou-se correlações majoritariamente positivas e ligeiramente maiores que nos extremos de precipitação. Em sua maioria, as correlações ficam em torno de 0,6, ultrapassando 0,7 em algumas regiões para determinados extremos. A exemplo, na região AMZ para o índice TN10p e no NEB para TN10p, TN90p e TX10p quando as simulações são comparadas às reanálises do MERRA-2 (Figura 4.12), a qual é ligeiramente melhor representada pelos modelos do HELIX do que o ERA-5 (Figura 4.11). As rodadas do EC-EARTH3-HR estão mais concentradas e próximas ao desvio nulo para TX10p, TX90p e WSDI na AMZ, sendo neste último o de menor dispersão. Também, apresentam os menores erros associados tanto em simular o ERA-5 quanto o MERRA-2, mostrando maior ajuste para esses índices na região amazônica em relação às outras. Entretanto, mesmo assim, as correlações não ultrapassam 0,8 em nenhuma das sub-regiões e índices, os EQMs continuam elevados e os desvios padrão consideravelmente grandes, demonstrando ainda deficiências em representar as reanálises dos extremos de temperatura.

De maneira geral, as rodadas do EC-EARTH3-HR apresentaram maior acurácia dentre todos os extremos, exceto para CDD e TN10p. Os índices WSDI e CDD foram os melhores representados, com destaque para a sub-região AMZ, na qual as simulações ficaram mais próximas às observações. Nota-se que os índices de temperatura têm os menores vieses e, conseqüentemente, melhores desempenhos em simularem o presente quando comparados aos de precipitação, concordando com Natividade, Garcia e Torres (2017) e Gouveia et al. (2022).

A menor habilidade dos modelos em simular os índices, principalmente os de precipitação, pode estar relacionada à diversos motivos: grande dificuldade em representar suas parametrizações; complexidade estatística no cálculo dos índices extremos, uma vez que são derivados das variáveis precipitação e temperatura e suas simulações possuem qualidade inferior às variáveis em si; utilização de reanálises, as quais carregam maiores incertezas em relação ao dado propriamente observado; ou, até mesmo, devido à interpolação utilizada para equiparar a resolução espacial dos dados. Essas deficiências do modelo podem ser melhoradas não somente com os avanços tecnológicos que permitem cálculos mais complexos e completos, como também com um maior detalhamento dos processos meteorológicos, assimilação de dados e aperfeiçoamentos nas parametrizações.

Apesar da resolução mais refinada que diversos MCGs, por exemplo, do CMIP5 e CMIP6 possuem, eles ainda costumam representar eventos climáticos extremos com intensidade e frequência diferentes das observações, particularmente para eventos relacionados à precipitação (KIKTEV et al., 2003; AVILA-DIAZ et al., 2023). Contudo, ressalta-se consideráveis melhorias particularmente na representação da topografia e na detecção de movimentos verticais e convectivos mais intensos, uma vez que o espaçamento de grade é pequeno. No geral, os vieses pequenos e a maior aproximação entre as simulações dos modelos do HELIX e as observações e reanálises na sub-região AMZ podem ser resultantes da captação mais detalhada desses movimentos verticais e convectivos que são comumente observados na região, devido à floresta e a alta quantidade de precipitação local. Essas características e processos são essenciais na análise de eventos extremos e, portanto, permitem uma análise mais acurada, evidenciando a importância de modelos mais refinados para sua representação.

Sondermann et al. (2022) avaliaram as tendências de precipitação e temperatura nas projeções climáticas sobre a Bacia do Rio Doce em Minas Gerais. Eles utilizaram projeções de alta resolução do modelo regional Eta em 20 km aninhados em três modelos globais (CanESM2-ES, HadGEM2-ES e MIROC5) e em resolução de 5 km aninhado no HadGEM2-ES. As simulações Eta de 5 km capturaram um maior detalhamento espacial de precipitação intensa em regiões de topografia elevada, verificando que a resolução maior teve melhor desempenho em representar essa variável.

Figura 4.10 – Diagramas de Taylor para as simulações dos índices de precipitação CDD (a, b, c), R10mm (d, e, f), R30mm (g, h, i), R95p (j, k, l) e Rx5Day (m, n, o) nas sub-regiões AMZ (esquerda), NEB (central) e S/SEB (direita) para todos os MCGs do HELIX. Em azul são representadas as 7 rodadas do EC-EARTH3-HR e, em vermelho, as 6 rodadas do HadGEM3. O diagrama mostra a correlação de Pearson (linhas pretas), erro quadrático médio (linhas circulares verdes) e desvio padrão (linhas circulares azuis). O quadrado verde na abscissa representa as observações CHIRPS e o período utilizado das séries de dados foi 1981-2010.

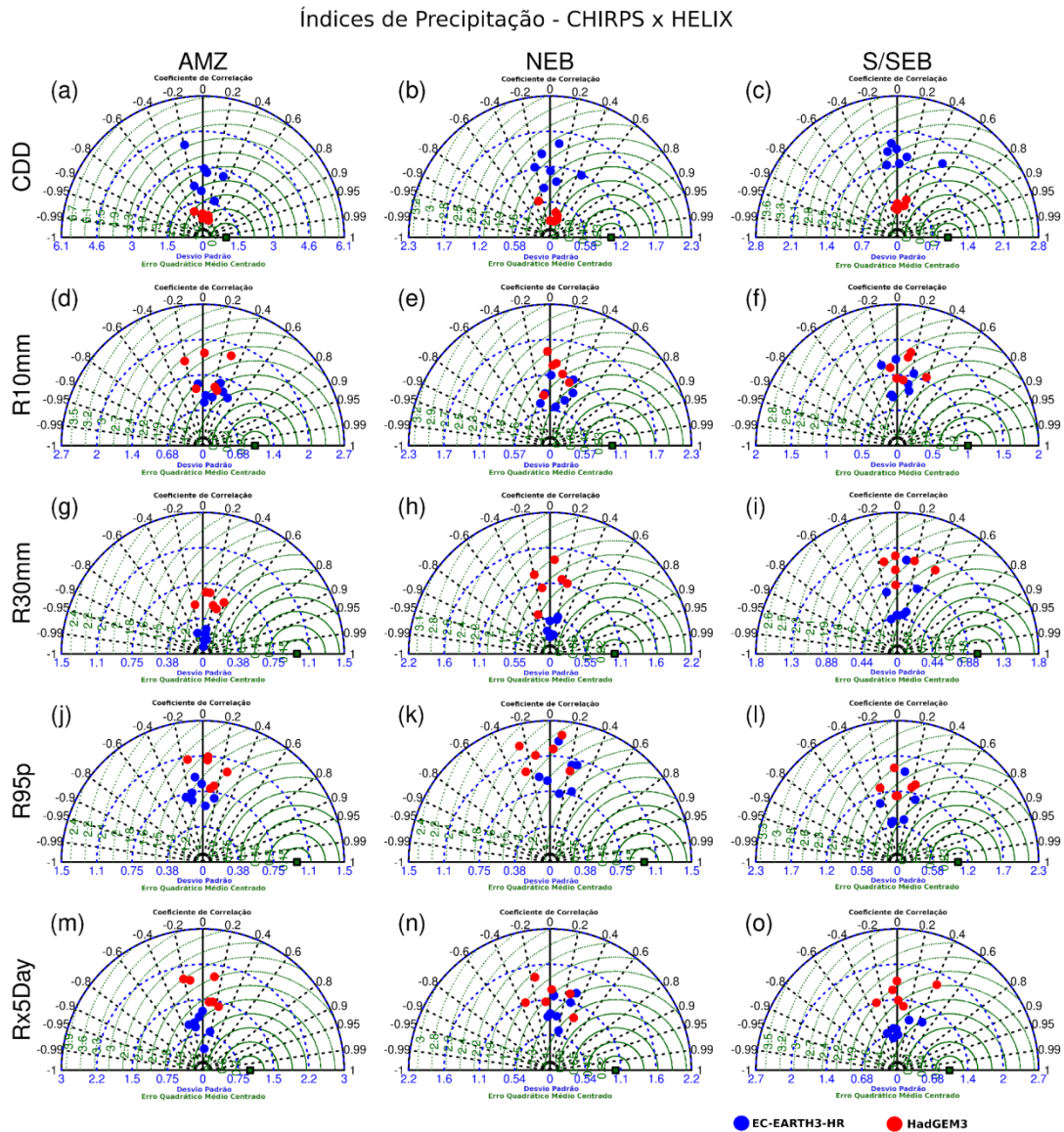


Figura 4.11 – Diagramas de Taylor para as simulações dos índices de temperatura TN10p (a, b, c), TN90p (d, e, f), TX10p (g, h, i), TX90p (j, k, l) e WSDI (m, n, o) nas sub-regiões AMZ (esquerda), NEB (central) e S/SEB (direita) para todos os MCGs do HELIX. Em azul são representadas as 7 rodadas do EC-EARTH3-HR e, em vermelho, as 6 rodadas do HadGEM3. O diagrama mostra a correlação de Pearson (linhas pretas), erro quadrático médio (linhas circulares verdes) e desvio padrão (linhas circulares azuis). O quadrado verde na abscissa representa as reanálises ERA-5 e o período utilizado das séries de dados foi 1981-2010.

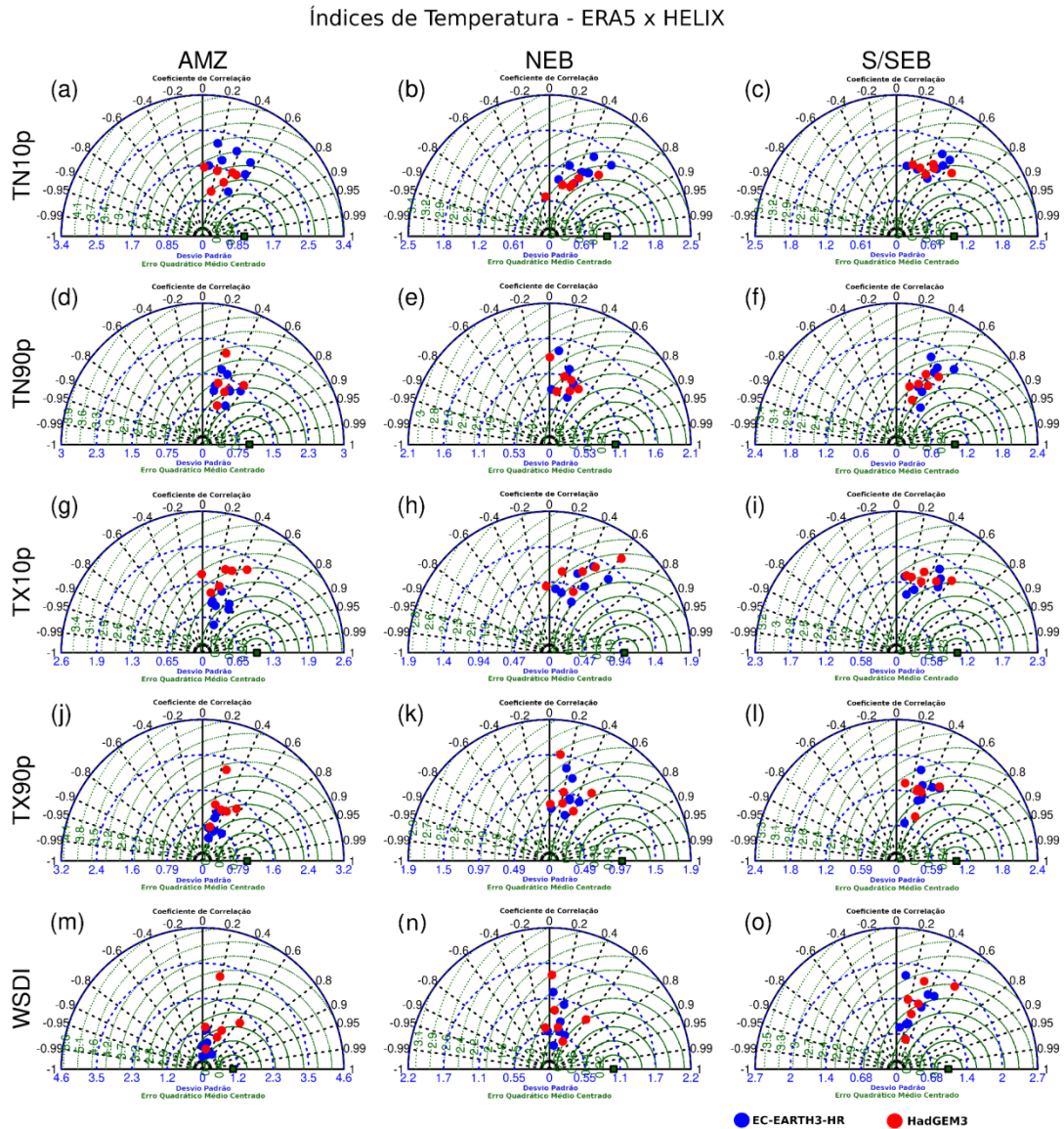
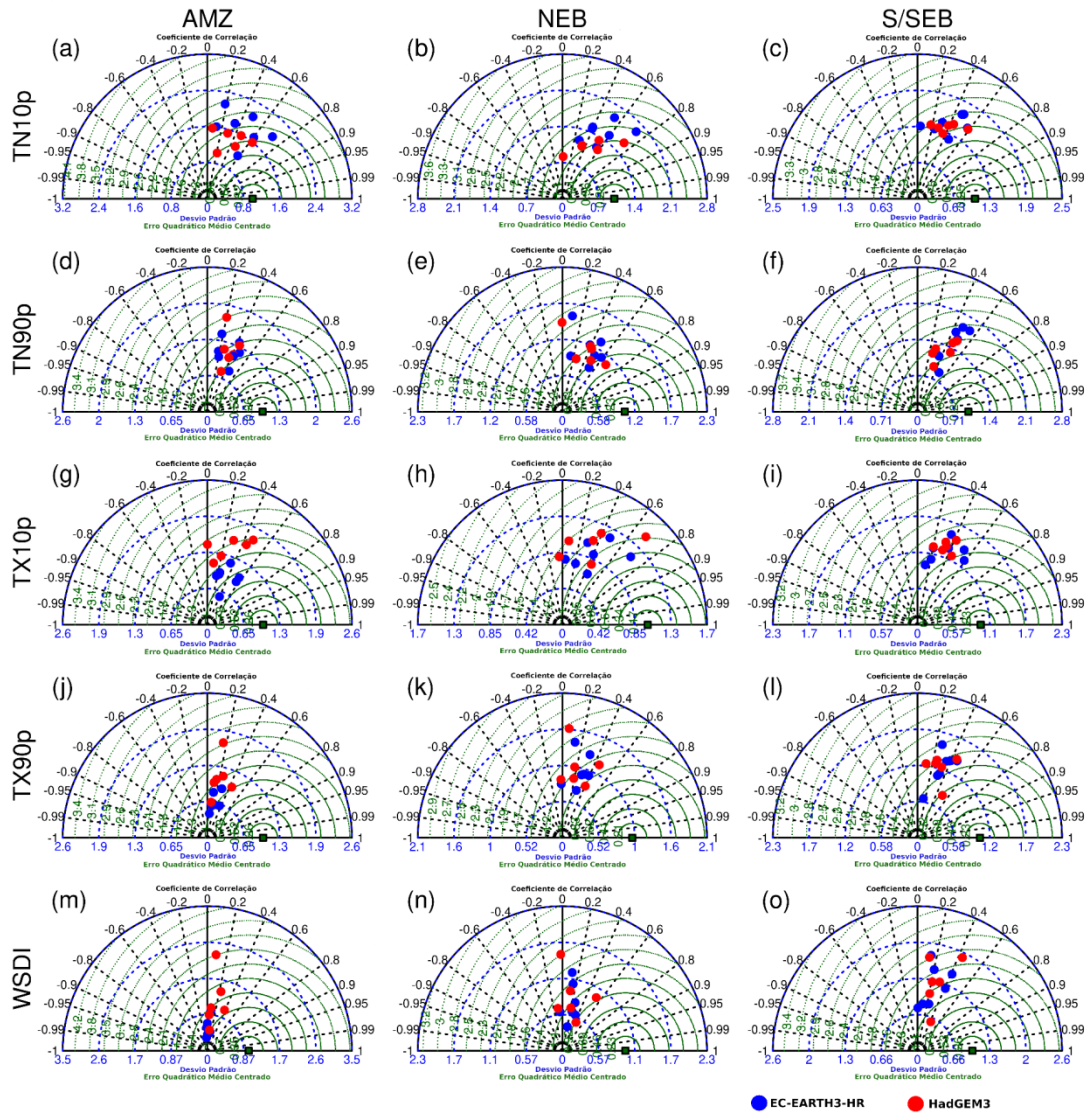


Figura 4.12 – Diagramas de Taylor para as simulações dos índices de temperatura TN10p (a, b, c), TN90p (d, e, f), TX10p (g, h, i), TX90p (j, k, l) e WSDI (m, n, o) nas sub-regiões AMZ (esquerda), NEB (central) e S/SEB (direita) para todos os MCGs do HELIX. Em azul são representadas as 7 rodadas do EC-EARTH3-HR e, em vermelho, as 6 rodadas do HadGEM3. O diagrama mostra a correlação de Pearson (linhas pretas), erro quadrático médio (linhas circulares verdes) e desvio padrão (linhas circulares azuis). O quadrado verde na abscissa representa as reanálises MERRA-2 e o período utilizado das séries de dados foi 1981-2010.

Índices de Temperatura - MERRA2 x HELIX



5 PROJEÇÕES E MUDANÇAS DA VARIÁVEL CLIMÁTICA

Após avaliação dos modelos do HELIX, na qual optou-se por utilizar todas as 13 rodadas referentes ao EC-EARTH3-HR e ao HadGEM3, obteve-se a mudança da variável climática (ou anomalia futura), resultante da diferença entre as projeções de cada SWL (1.5, 2.0 e 4.0) e as simulações (1981-2010). Conjuntamente, fez-se a classificação dessa anomalia em 3 diferentes classes: **mudança robusta**, onde mais de 50% das rodadas dos ensembles são significantes e mais de 80% concordam em sinal; **mudança incerta ou não confiável**, na qual mais de 50% das rodadas são significantes e menos de 80% concordam em sinal; **mudança não-significativa**, referindo-se a mais de 80% das rodadas sem significância estatística, independente da concordância de sinal. Quando mais de 20% e menos de 50% dos modelos apresentam mudanças significativas, esses não se encaixam em nenhuma das classes acima, ficando indefinidas (em branco).

As significâncias estatísticas em questão foram calculadas por meio do Teste-*t* de *Student* e mostradas singularmente no Apêndice B. De maneira geral, todas as rodadas forçantes de ambos os modelos não apresentaram significância dos índices de precipitação para SWL 1.5 e SWL 2.0, sendo apenas significantes algumas áreas com as anomalias mais intensas no SWL 4.0. Já os índices de temperatura mostraram significância em grande parte da América do Sul (exceto Argentina) para os extremos frios em todos os níveis de aquecimento e, em SWL 4.0, as maiores áreas significantes para os extremos quentes.

As projeções do ensemble EC-EARTH3-HR (Figura 5.1) indicam anomalias positivas de CDD sobre os Andes, países do norte da AS e área entre Minas Gerais e Bahia para SWL 1.5 (0-8 dias), aumentando a intensidade dessas mudanças e abrangendo as regiões Norte, Nordeste, Centro-Oeste e Sudeste para SWL 2.0 e SWL 4.0, alcançando entre 16 e 24 dias de estiagem principalmente no semiárido nordestino, norte de MG e entre Amapá e Pará. Quando analisado o ensemble HadGEM3 (Figura 5.2), as mudanças são suavemente negativas (< 4 dias) na maioria do Brasil e indicam redução de CDD, chegando a decréscimo de 12 dias em Rondônia no SWL 4.0, apresentando também uma faixa no norte e no litoral nordestino de anomalias positivas (4-12 dias). Já as projeções do ensemble HELIX (Figura 5.3) mostraram mudanças positivas de CDD um pouco menos intensas, porém nas mesmas regiões do EC-EARTH3-HR, estando

também em concordância com Chou et al. (2014), os quais destacaram comportamento e região semelhantes deste extremo de precipitação para o final do século XXI (2071-2100).

Silva, Mello e Chou (2022) analisaram a severidade das secas no Sul de Minas Gerais para o ano hidrológico (outubro a setembro) no período 1970-2020 e as projeções de secas para a região nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 utilizando o modelo regional Eta de 20 km de resolução espacial e 4 MCGs forçantes. Os autores encontraram que o período entre 2013 e 2014 foi o mais seco no Sul de Minas, seguido dos anos 2014-2015, o que levou a escassez de água, redução da produção de energia hidrelétrica e redução da produção da cultura de café. Os cenários futuros indicaram que secas extremamente severas continuarão a ocorrer na área, porém elas serão raras, com frequência semelhante às observadas.

Quando analisado o índice R10mm, a maior parte da área de estudo apresenta mudança positiva (0-3 dias) no ensemble EC-EARTH3-HR, exceto entre SE e NE. Essa mudança vai se intensificando com o aumento de SWL, porém diminuindo sua abrangência e limitando mais à parte da região equatorial, Sul do Brasil e Patagônia (9 dias) em SWL 4.0. Já as pequenas áreas com anomalias negativas se expandem para a região central do Brasil, com destaque ao SE (até 9 dias) no maior nível de aquecimento. Em relação ao ensemble HadGEM3, os modelos também projetam anomalias positivas para o Sul e ainda parte do SE, chegando em 12 dias. Porém, o comportamento no norte da AS e região amazônica é contrário, mostrando diminuição de R10mm entre 0-6 dias, que poderá ultrapassar 21 dias no sudoeste e nordeste da AMZ, principalmente para SWL 4.0.

Os índices R30mm, R95p e Rx5Day mostram-se semelhantes em cada ensemble. Para EC-EARTH3-HR, projetam aumento desses extremos em todo o território, em destaque Sul do Brasil e Uruguai (1-2 dias para R30mm, 40-80 mm para R95p, 6-12 mm para Rx5Day). Com o crescimento de SWL, essas mudanças se tornarão mais intensas e se expandirão também para a porção sul do Paraguai e norte argentino, chegando a 5 dias de R30mm, 200 mm para R95p e 30 mm para Rx5Day na região Sul em SWL 4.0. Além disso, as projeções nesse mesmo nível de aquecimento mostram o surgimento de uma anomalia positiva na AMZ, Peru, Equador e Colômbia para os três extremos, sendo mais suave para R30mm (1-2 dias), se prolongando para leste da AMZ e NEB em R95p

(80-120 mm) e se espalhando por todo o Brasil para Rx5Day (6-12 mm). Já para ensemble HadGEM3, as rodadas indicam mudanças também no Sul do país, porém mais intensas e se estendendo ao SE e parte do CO, chegando a 6 dias de R30mm no Rio Grande do Sul e Santa Catarina; 240 mm no Sul do Brasil, parte de São Paulo, Minas Gerais, Rio de Janeiro para R95p; e Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Paraguai para Rx5Day (36 mm). Mas, na região AMZ, em especial no leste, o sinal da mudança é contrário ao ensemble EC-EARTH3-HR, sendo as anomalias negativas para esses extremos de precipitação.

Tavares et al. (2023) mostraram as projeções de extremos de precipitação nos níveis de aquecimento de 1,5 °C e 2 °C sob os cenários RCP4.5 e RCP8.5, utilizando o modelo regional Eta com os MCGs forçantes CanESM2, HadGEM2-ES, MIROC5, and BESM. Os resultados evidenciam precipitação significativa (R95p) para o Sul do Brasil e duração de estiagens prolongadas (CDD) sobre o NEB e porção norte da região SEB para ambos os cenários, sendo mais pronunciados para SWL 2 °C em comparação com SWL 4 °C, corroborando com os atuais resultados.

No geral, as projeções de extremos de precipitação apontam escassez de chuvas no leste da AMZ e NEB, aumento de CDD no Platô brasileiro e Cordilheira dos Andes, e maior quantidade de precipitação no oeste da AMZ, Sul do Brasil e norte da Argentina. Esses comportamentos foram também mostrados por diversos trabalhos (MARENGO et al., 2009; SOARES; MARENGO, 2009; KITO; KUSUNOKI; NAKAEGAWA, 2011; GOUVEIA et al., 2022; BRITO et al., 2022) e retratados pelo IPCC no relatório de extremos climáticos (IPCC, 2012), reforçando os atuais resultados que essas regiões serão acometidas por secas e excesso de chuvas no futuro e indicando uma maior confiança nas projeções dos modelos do HELIX. Ressalta-se que o aumento de um índice de precipitação intensa não impede a existência e veracidade de um índice que indique escassez de chuva na mesma área, pois a ocorrência de cada um deles pode ser em diferentes estações e períodos, sendo considerados independentes.

Ao analisar a classificação das mudanças, não se pôde identificar robustez das projeções sobre a América do Sul em nenhum dos extremos de precipitação, os quais mostraram mudanças não-significativas sobre a região em todos os níveis de aquecimento, ou mesmo não se enquadraram nas três classes determinadas, estando entre 20% e 50% de rodadas significantes.

Figura 5.1 – Mudanças anuais dos índices extremos de precipitação CDD (*a, f, k*), R10mm (*b, g, l*), R30mm (*c, h, m*), R95p (*d, i, n*), Rx5Day (*e, j, o*) projetadas para SWL 1.5 (superior), SWL 2.0 (central) e SWL 4.0 (inferior), provenientes do ensemble das rodadas do EC-EARTH3-HR. As mudanças são definidas como a diferença entre as projeções e o período de referência (1981-2010), sendo também classificadas em não-significativas (\\), robustas (///) e incertas (omitida).

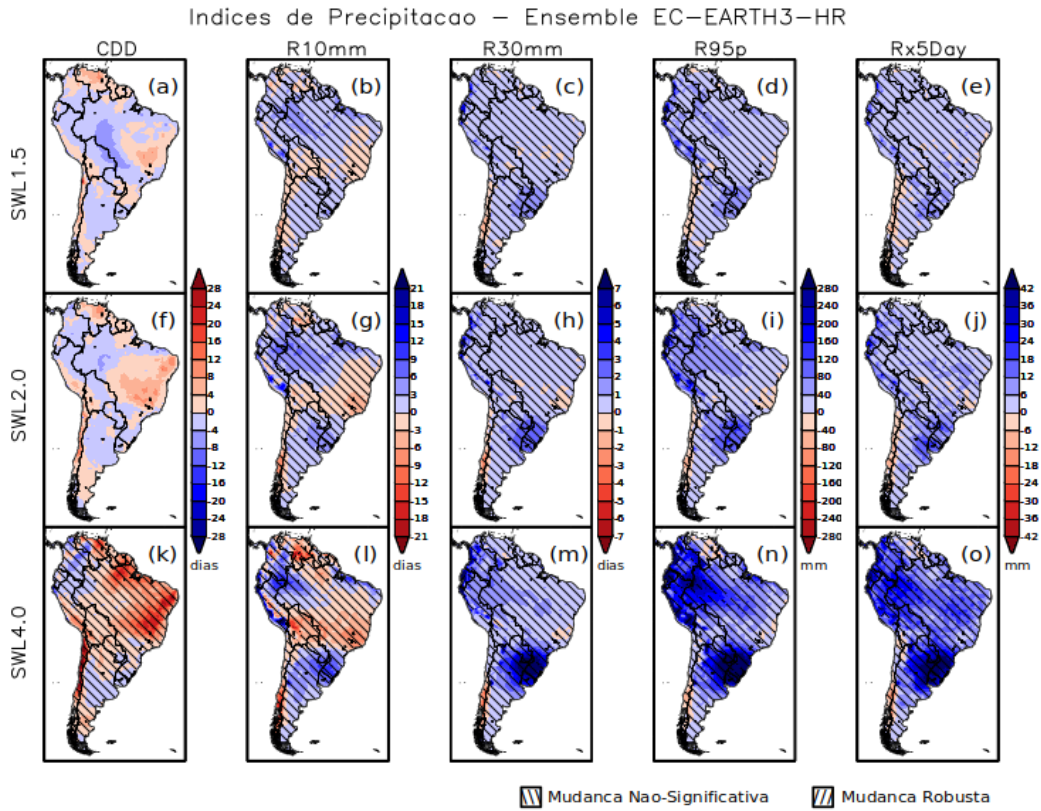


Figura 5.2 – Mudanças anuais dos índices extremos de precipitação CDD (*a, f, k*), R10mm (*b, g, l*), R30mm (*c, h, m*), R95p (*d, i, n*), Rx5Day (*e, j, o*) projetadas para SWL 1.5 (superior), SWL 2.0 (central) e SWL 4.0 (inferior), provenientes do ensemble das rodadas do HadGEM3. As mudanças são definidas como a diferença entre as projeções e o período de referência (1981-2010), sendo também classificadas em não-significativas (\\), robustas (//) e incertas (omitida).

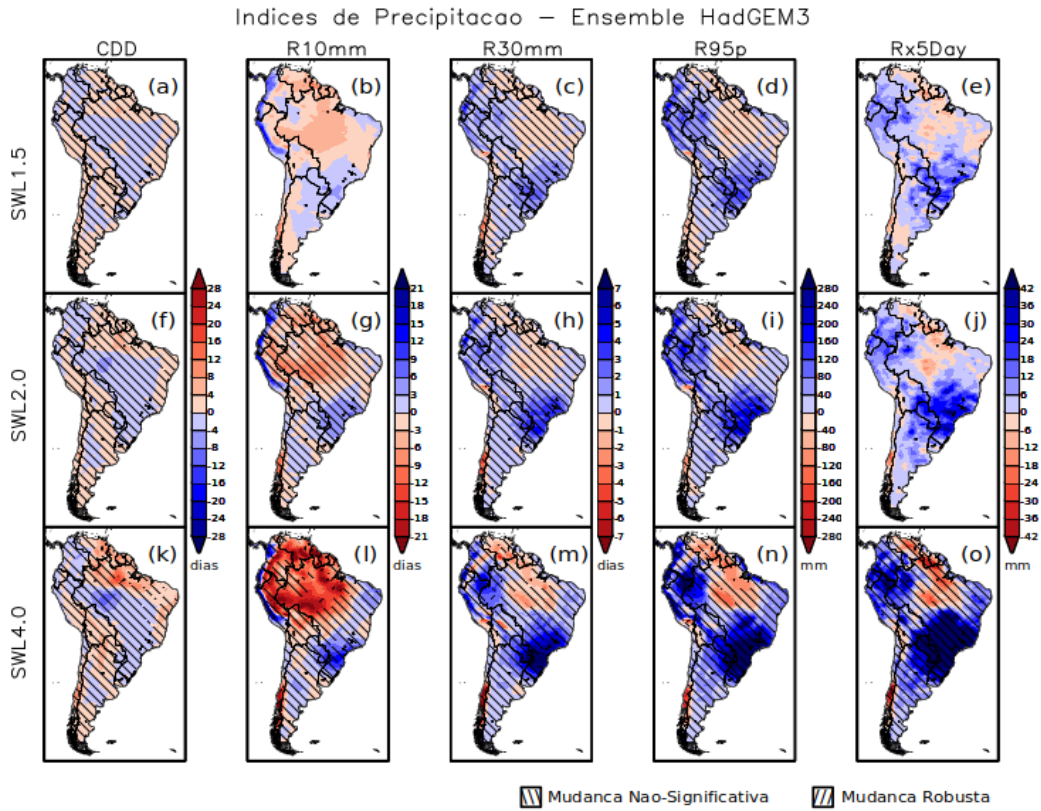
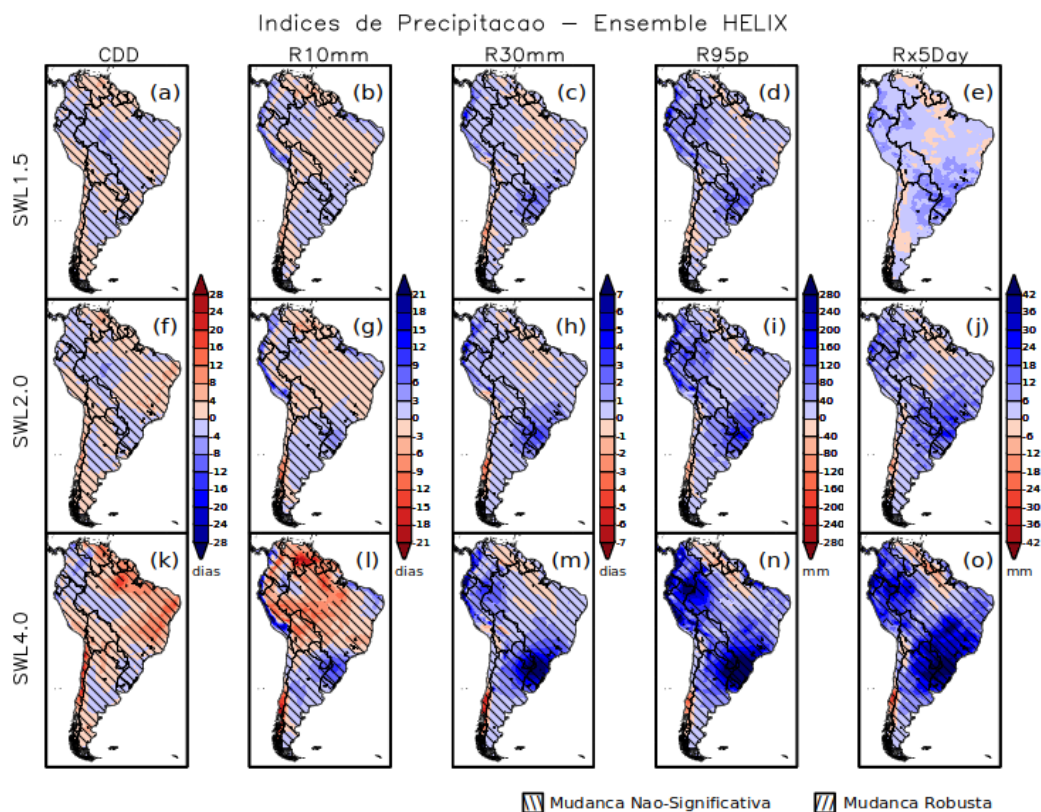


Figura 5.3 – Mudanças anuais dos índices extremos de precipitação CDD (*a, f, k*), R10mm (*b, g, l*), R30mm (*c, h, m*), R95p (*d, i, n*), Rx5Day (*e, j, o*) projetadas para SWL 1.5 (superior), SWL 2.0 (central) e SWL 4.0 (inferior), provenientes do ensemble das rodadas do HELIX. As mudanças são definidas como a diferença entre as projeções e o período de referência (1981-2010), sendo também classificadas em não-significativas (\\), robustas (///) e incertas (omitida).



Para os índices de temperatura, as projeções concordam com os resultados do IPCC (2012, 2023) e de trabalhos como Marengo et al. (2009), Natividade, Garcia, Torres (2017), Avila-Diaz et al. (2020) e Gouveia et al. (2022), evidenciando diminuição de TN10p e TX10p, e aumento de TN90p, TX90p e WSDI. Neste caso, onde as maiores anomalias, tanto negativas quanto positivas para esses extremos, ocorrerão na região tropical para SWL 1.5, se estendendo na direção sul do continente e intensificando o valor das mudanças com o aumento do nível de aquecimento. Comparativamente, haverá maior diminuição de ocorrência de noites frias do que dias frios, enquanto o aumento será mais pronunciado em noites quentes do que dias quentes. Na faixa tropical, por exemplo, o ensemble EC-EARTH3-HR (Figura 5.4) projeta para SWL 1.5 (SWL 4.0) decréscimo de 10% (10%) para TN10p e 7% (11%) para TX10p, e aumento de 50% (90%) para TN90p, 20% (70%) para TX90p e 60 dias (240 dias) para WSDI,

expandindo essas mudanças para grande parte da América do Sul, principalmente a porção norte. Já o ensemble HadGEM3 (Figura 5.5) apresenta comportamento muito semelhante ao EC-EARTH3-HR para TN10p e TN90p, porém magnitudes mais pronunciadas dos demais índices: no SWL 1.5, diminuição de 9% de TX10p, aumento de 40% de TX90p e aumento de 120 dias para WSDI, alcançando decréscimo de 10% e acréscimo de 90% em quantidade de TX10p e TX90p, respectivamente, enquanto o aumento de WSDI pode chegar a 270 dias no SWL 4.0, principalmente para a região AMZ e países do norte da AS.

As emissões de gases do efeito estufa (GEE) implicam em um incremento de temperatura que tem grande probabilidade de exceder 1,5 °C durante o século XXI, podendo ainda superar os 4 °C na faixa tropical e causar ainda mais impactos (IPCC, 2014, 2023). Esse aquecimento da atmosfera torna a amplitude térmica menor durante o dia, resultando em aumento dos episódios quentes e diminuição dos frios. Então, faz-se pertinente os resultados das projeções dos modelos que indicam aumento de TN90p, TX90p e WSDI, e decréscimo de TN10p e TX10p.

As mudanças mostram-se robustas no norte da AS, AMZ, NEB, CO, SEB apenas para TN10p e TX10p em SWL 1.5, no qual as demais áreas e índices não apresentaram significância nos ensembles. Para SWL 2.0, as mudanças tornaram-se robustas em grande parte da AS, exceto para a área que abrange a Argentina, Paraguai, Uruguai e Bolívia tanto para SWL 2.0 quanto para SWL 1.5 em todos os índices de temperatura. No SWL 4.0, os cinco extremos de temperatura têm mudanças robustas, com exceção de WSDI, o qual apresentou robustez apenas para a porção norte da AS e mudanças não-significativas na Argentina.

Como as mudanças nas projeções são mais intensas e pronunciadas para o ensemble HadGEM3 em relação ao EC-EARTH3-HR, quando analisados conjuntamente todos os modelos do HELIX (Figura 5.6), os resultados indicam um cenário futuro com sinais da mudança e abrangência semelhantes ao HadGEM3, com uma suavização das intensidades quando feito a média das 13 rodadas.

Figura 5.4 – Mudanças anuais dos índices extremos de temperatura TN10p (a, f, k), TN90p (b, g, l), TX10p (c, h, m), TX90p (d, i, n), WSDI (e, j, o) projetadas para SWL 1.5 (superior), SWL 2.0 (central) e SWL 4.0 (inferior), provenientes do ensemble das rodadas do EC-EARTH3-HR. As mudanças são definidas como a diferença entre as projeções e o período de referência (1981-2010), sendo também classificadas em não-significativas (\\), robustas (//) e incertas (omitida).

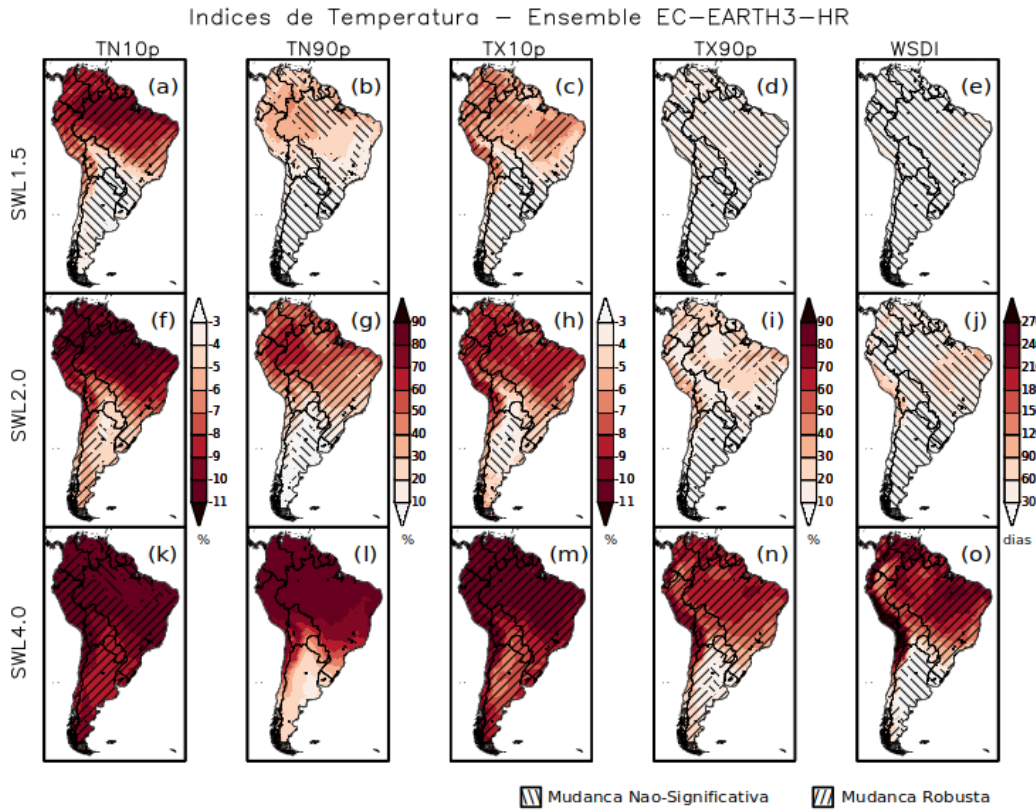


Figura 5.5 – Mudanças anuais dos índices extremos de temperatura TN10p (a, f, k), TN90p (b, g, l), TX10p (c, h, m), TX90p (d, i, n), WSDI (e, j, o) projetadas para SWL 1.5 (superior), SWL 2.0 (central) e SWL 4.0 (inferior), provenientes do ensemble das rodadas do HadGEM3. As mudanças são definidas como a diferença entre as projeções e o período de referência (1981-2010), sendo também classificadas em não-significativas (\\), robustas (///) e incertas (omitida).

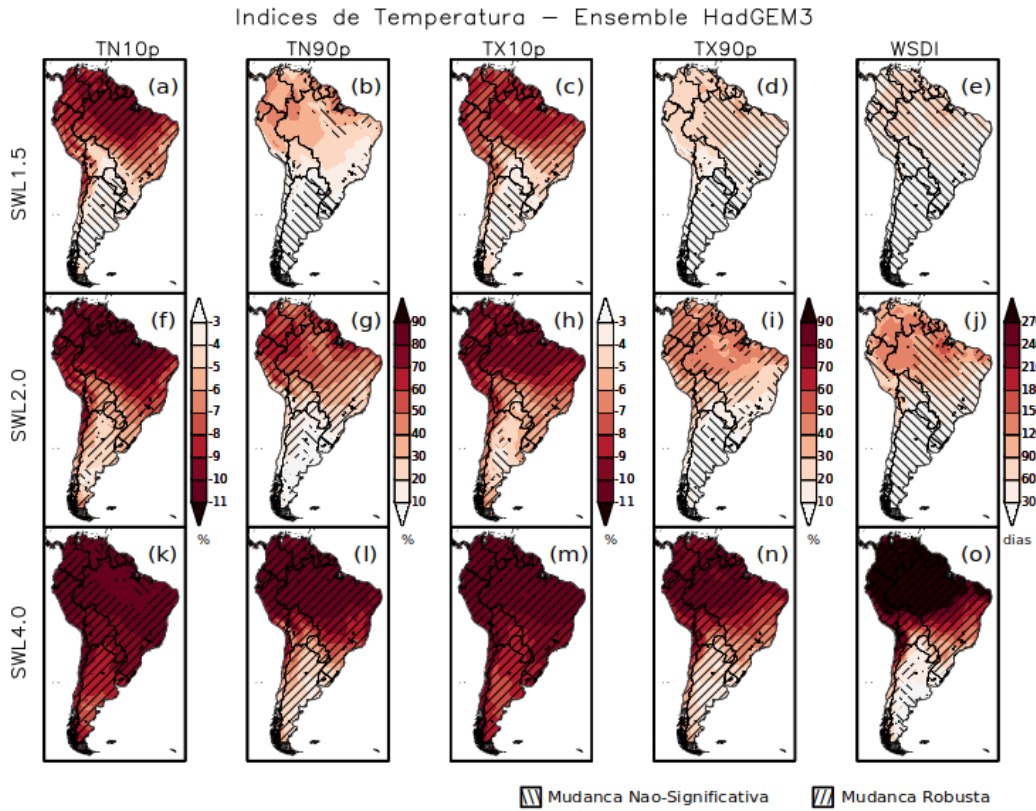
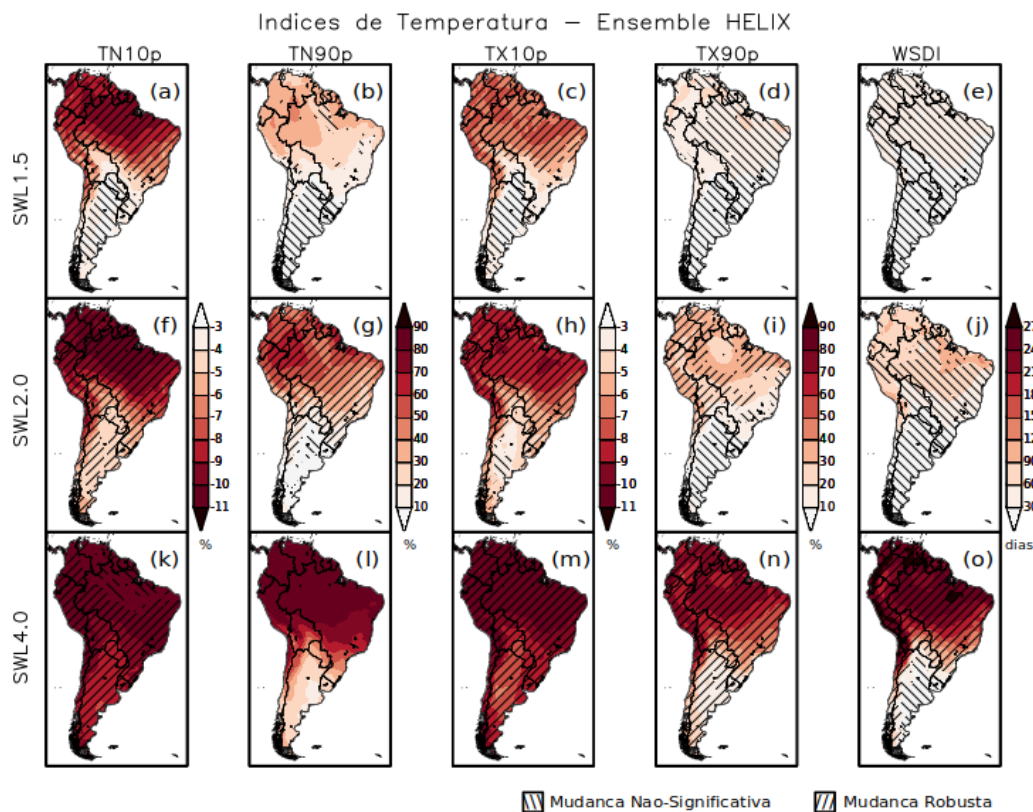


Figura 5.6 – Mudanças anuais dos índices extremos de temperatura TN10p (a, f, k), TN90p (b, g, l), TX10p (c, h, m), TX90p (d, i, n), WSDI (e, j, o) projetadas para SWL 1.5 (superior), SWL 2.0 (central) e SWL 4.0 (inferior), provenientes do ensemble das rodadas do HELIX. As mudanças são definidas como a diferença entre as projeções e o período de referência (1981-2010), sendo também classificadas em não-significativas (\\), robustas (///) e incertas (omitida).

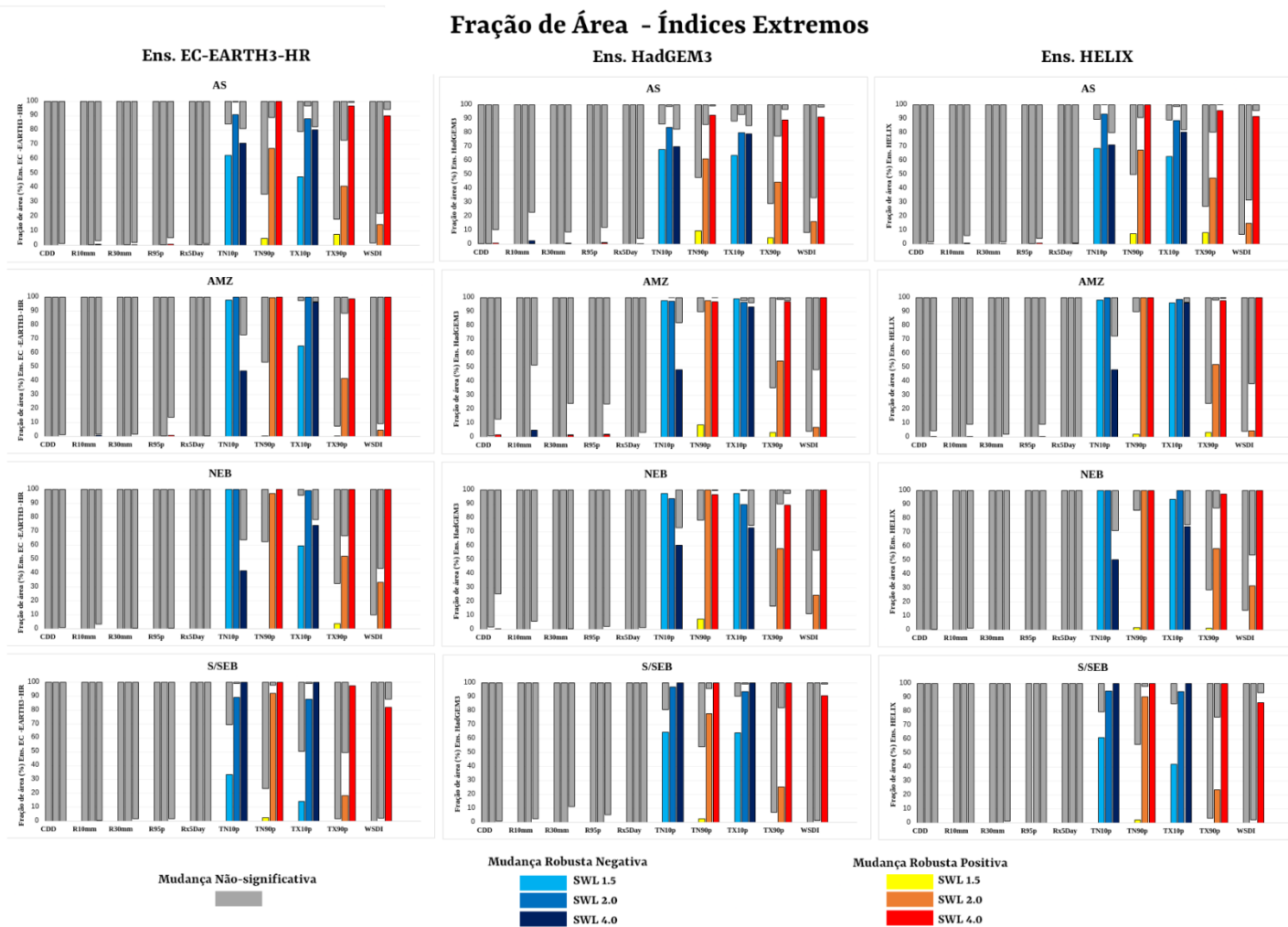


Complementarmente, representou-se graficamente a fração de área (Figura 5.7) da AS como um todo e das sub-regiões AMZ, NEB e S/SEB correspondente à mudança não-significativa e às mudanças robustas (negativa e positiva) nos diferentes SWLs (1.5, 2.0 e 4.0). Os valores percentuais para cada um dos ensembles e regiões também estão dispostos nas Tabelas C.1 a C.6 (Apêndice C).

A fração de área com mudanças não-significativas foi de 100% ou próxima a totalidade em todos os níveis de aquecimento e extremos de precipitação, significando que mais de $\frac{3}{4}$ das rodadas dos modelos apresentaram significância estatística, independente da concordância de sinal da mudança dentro do conjunto. Apenas alguns desses índices apresentaram pequena quantidade de mudanças robustas para o SWL 4.0, não ultrapassando 5% de área com anomalias significativas sobre a AMZ no ens. HadGEM3, por exemplo. Em relação aos extremos de temperatura, as análises mostram

que TN90p tem as maiores frações de área com mudança robusta para aquecimento de 1,5 °C e 2 °C, chegando a 100% no SWL 4.0 nos ensembles e sub-regiões. Também, os índices de temperatura mínima apresentaram robustez em grande parte do continente, atingindo entre 93% e 98% de área no SWL 1.5 para AMZ e NEB. Já WSDI evidencia mais área de mudanças não-significativas em SWL 1.5 e SWL 2.0, chegando a 100% no S/SEB. De maneira geral, os índices de temperatura têm fração de área crescente com o nível de aquecimento, alcançando quase a totalidade no SWL 4.0 na AS e sub-regiões. Porém, para TN10p e TX10p, o comportamento é um pouco diferente, uma vez que decaí a porcentagem de mudança robusta para o maior nível de aquecimento em relação aos demais, principalmente na AMZ e NEB.

Figura 5.7 – Fração de área (%) com mudança robusta (barras coloridas) ou não-significativa (barras cinzas) comparada ao período de referência 1981-2010 para os índices de precipitação e temperatura, quando diferentes SWLs. As colunas representam, respectivamente, os ensembles EC-EARTH3-HR, HadGEM3 e HELIX para a AS (linha 1) e sub-regiões AMZ (linha 2), NEB (linha 3) e S/SEB (linha 4). Tons frios mostram mudanças robustas negativas e tons quentes se referem às mudanças robustas positivas relativas a um aquecimento de 1.5 °C, 2 °C e 4 °C



Por fim, as PDFs apontam a fração de área a qual uma determinada mudança é esperada para os extremos em relação ao período de referência (1981-2010), sendo em termos de quantidade de desvios padrão (σ). Essa abordagem possibilita saber quão maior que a variabilidade interanual climatológica será a anomalia futura dos extremos. Os índices de precipitação (Figura 5.8) mostram variação da mudança no entorno de zero, evidenciando tanto mudanças positivas quanto negativas desses extremos. Para SWL 1.5, as anomalias ficam entre -1σ e 1σ para todos esses índices, indicando que a mudança não ultrapassará 1σ e será até uma vez maior do que a variabilidade interanual do passado. O range das anomalias fica maior entre os modelos e a variabilidade das mudanças aumenta com o aquecimento, alcançando em média $+4\sigma$ em R30mm, R95p, Rx5Day e 2σ para CDD e R10mm na AMZ, a qual se mostrou como a sub-região com as maiores anomalias em relação à variabilidade interanual. Portanto, as maiores mudanças dos cinco extremos de precipitação se darão sobre a AMZ, podendo chegar a ser 4 vezes superior a variabilidade interanual atual (1981-2010) quando um aquecimento de $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ for alcançado.

Quanto aos índices de temperatura (Figura 5.9), quando o nível de aquecimento atingir $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, as mudanças ficarão em torno de -1σ para TN10p e TX10p, e entre $+2\sigma$ e $+3\sigma$ para TN90p, TX90p e WSDI. A largura das curvas mostra-se maior que nos índices de precipitação e sofre ampliação com o aumento do aquecimento, evidenciando que as mudanças nos índices de temperatura em relação à climatologia serão maiores sobre o continente sul-americano. Assim, em SWL 4.0, os extremos de temperatura mínima terão anomalias negativas variando entre 1σ e 4σ para S/SEB, TX90p terá mudanças de 13σ em todas as sub-regiões, TN10p chega a 15σ no NEB e S/SEB, enquanto o destaque se dá para WSDI, o qual terá as maiores variações: 45σ no NEB; distribuição bimodal indicando mudança de 10σ em aproximadamente 40% da área S/SEB, outros 15% de território com anomalias de 20σ , atingindo 55σ em algumas áreas do S/SEB para esse nível de aquecimento de $4\text{ }^{\circ}\text{C}$; e cerca de 15% de área com mudança de 20σ na AMZ, chegando a 63σ em alguns pontos. Isto significa que a duração das ondas de calor pode ser 63 vezes superior que a variabilidade interanual da atualidade (1981-2010) na AMZ caso o aquecimento atinja $4\text{ }^{\circ}\text{C}$, ou seja, o período em que as ondas de calor permanecerão sobre a região amazônica será extremamente prolongado em relação às que já ocorrem e as suas consequências na população e diversidade local serão agravantes. Resumidamente, o SWL 4.0 é o de maior amplitude, sendo as maiores

mudanças de TN10p, TN90p e TX10p no S/SEB; de TX90p sobre a AMZ e NEB; e de WSDI também sobre a AMZ e, seguidamente, sobre o S/SEB.

Figura 5.8 – Função Densidade de Probabilidade (PDF) da fração de área com determinada mudança, comparada ao período de referência 1981-2010, para os índices de precipitação CDD (a, b, c), R10mm (d, e, f), R30mm (g, h, i), R95p (j, k, l) e Rx5Day (m, n, o). Linhas azuis referem-se ao SWL 1.5, linhas pretas ao SWL 2.0 e linhas vermelhas ao SWL 4.0, para as sub-regiões AMZ (coluna esquerda), NEB (coluna central) e S/SEB (coluna direita). Os resultados destacam a mediana (linha grossa) e o intervalo interquartil (linhas finas) das PDFs dos modelos individuais e as unidades estão em desvios-padrão da série temporal de referência 1981-2010 para cada índice extremo.

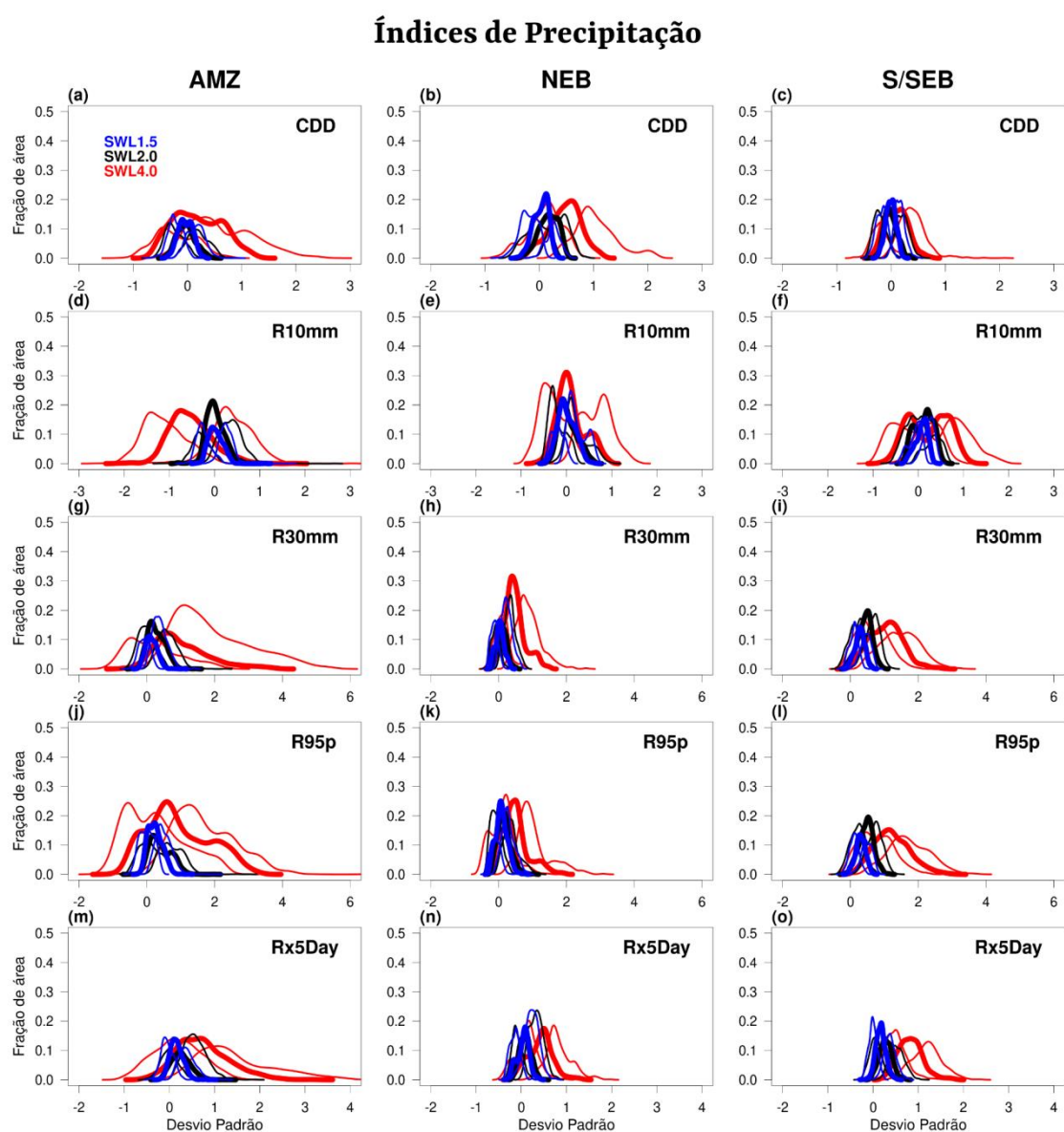
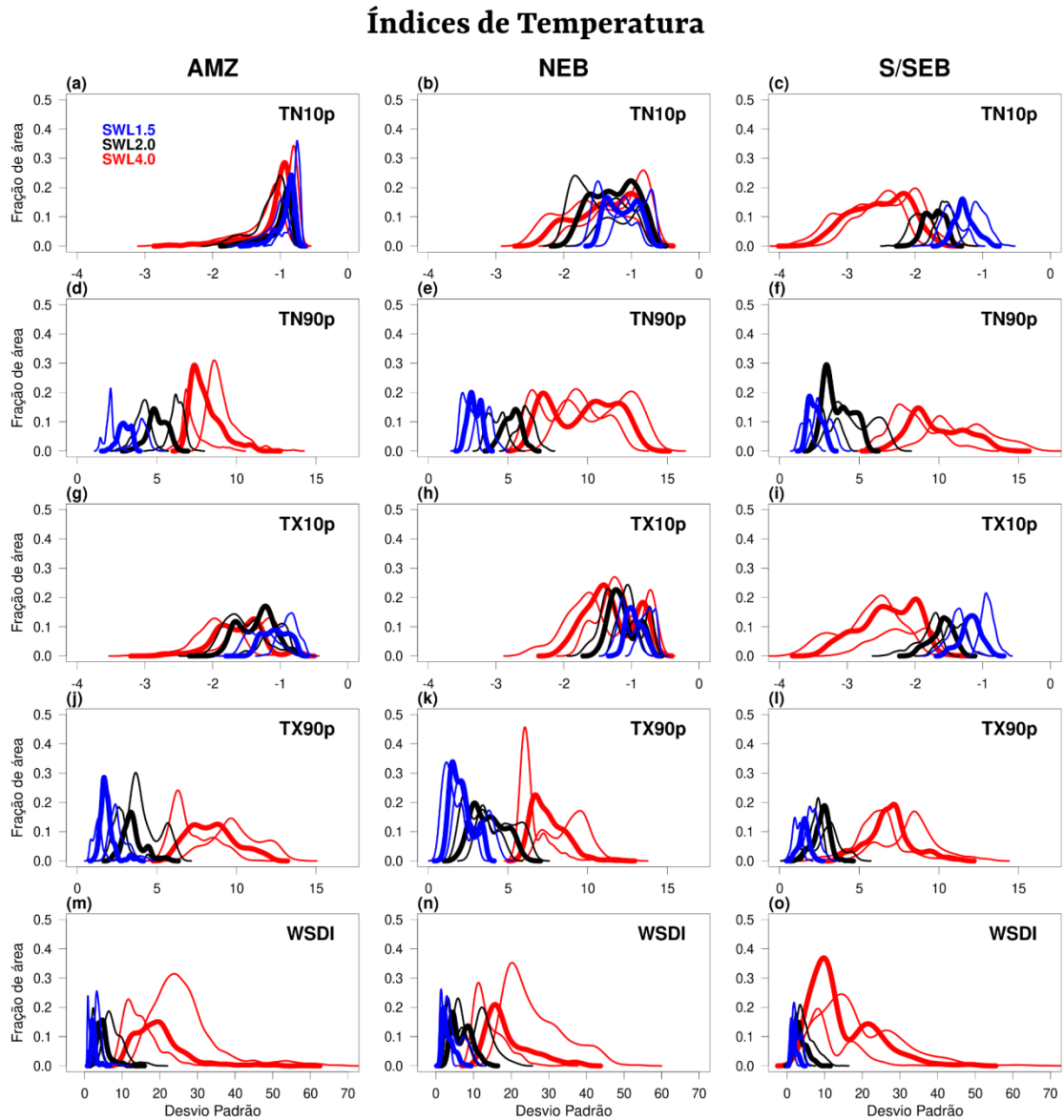


Figura 5.9 – Função Densidade de Probabilidade (PDF) da fração de área com determinada mudança, comparada ao período de referência 1981-2010, para os índices de temperatura TN10p (a, b, c), TN90p (d, e, f), TX10p (g, h, i), TX90p (j, k, l) e WSDI (m, n, o). Linhas azuis referem-se ao SWL 1.5, linhas pretas ao SWL 2.0 e linhas vermelhas ao SWL 4.0, para as sub-regiões AMZ (coluna esquerda), NEB (coluna central) e S/SEB (coluna direita). Os resultados destacam a mediana (linha grossa) e o intervalo interquartil (linhas finas) das PDFs dos modelos individuais e as unidades estão em desvios-padrão da série temporal de referência 1981-2010 para cada índice extremo.



6 INCERTEZAS DAS PROJEÇÕES

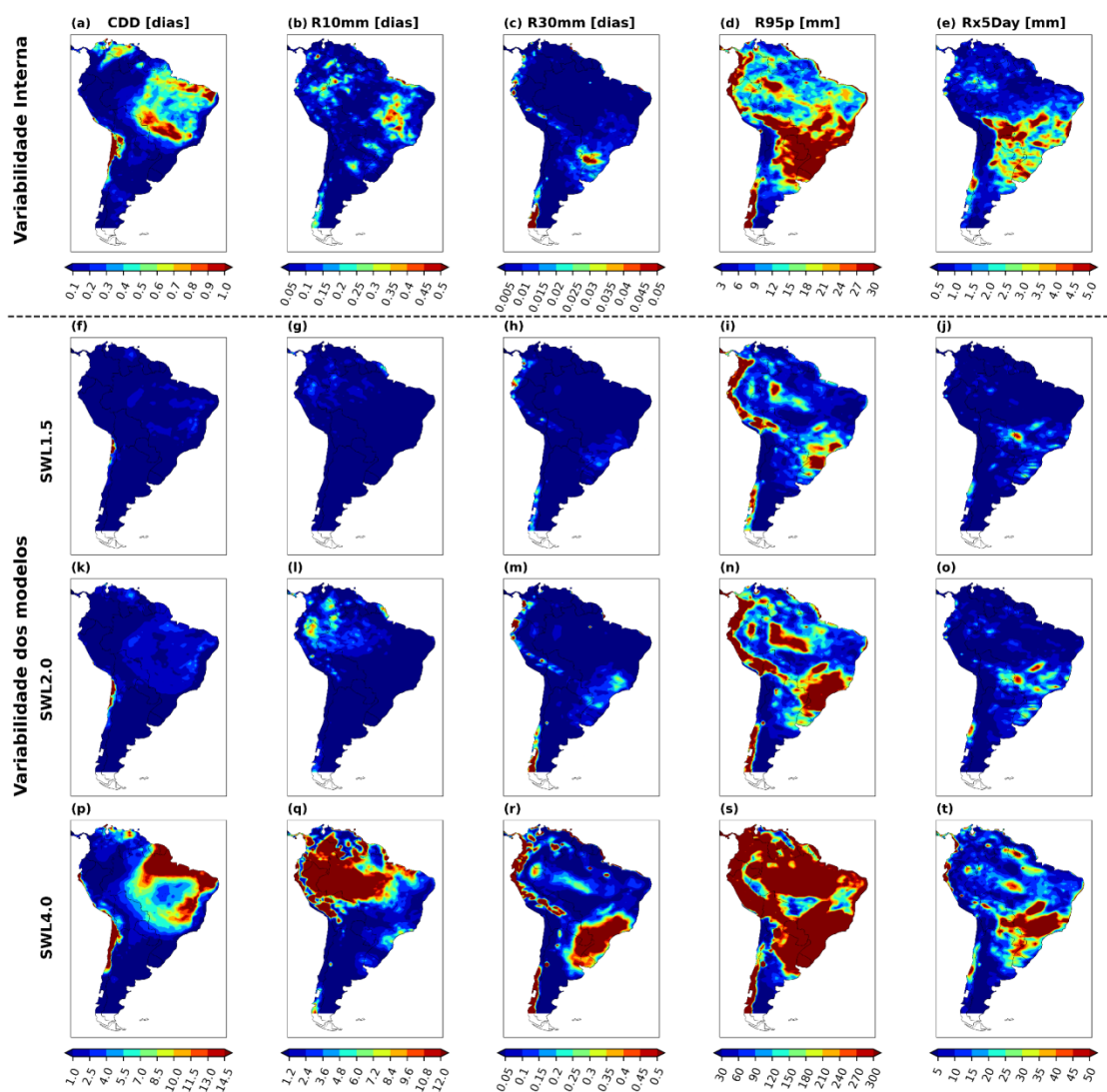
A análise das incertezas nas projeções tem papel fundamental, uma vez que se pode quantificar as incertezas e identificar quais períodos e regiões elas são predominantes, possibilitando, assim, minimizar os erros e aumentar a confiabilidade das projeções de extremos climáticos. Desta forma, obteve-se a Variabilidade Interna (considerada constante no tempo) e a Variabilidade dos Modelos para cada um dos SWLs referentes aos índices de precipitação e temperatura. A Variabilidade Interna refere-se à variação natural do clima e à complexidade do Sistema Climático. Já a Variabilidade dos Modelos diz respeito às suas configurações, parametrizações e rotinas computacionais utilizadas.

No geral, as variabilidades internas dos extremos de precipitação (Figura 6.1) são pequenas, principalmente para R10mm e R30mm, e as incertezas associadas aos modelos aumentam com o aquecimento. Para CDD, a variabilidade interna é inferior a 0,1 dia em grande parte da AS, e o destaque ocorre no nordeste do continente, onde os maiores valores ($> 1,0$ dias) estão em parte do SE e CO e litoral norte da Paraíba, Ceará, Rio Grande do Norte e Piauí, e sobre uma pequena porção central dos Andes. No SWL 1.5, as variabilidades inter-modelos estão abaixo de 1,0 dia em quase a totalidade da área de estudo, e com um aquecimento de $2\text{ }^{\circ}\text{C}$, essa incerteza se mostra crescente na região nordeste da AS, chegando a valores acima de 14,5 dias no litoral norte do Brasil e parte do NE no SWL 4.0. Já para R10mm, as maiores variabilidades internas (0,35 - 0,5 dias) são observadas na região central do Brasil e mais discretamente sobre o leste da AMZ e países adjacentes, enquanto as incertezas associadas aos modelos se tornam dominantes e mais intensas com o SWL, sendo superiores a 12 dias no NW da América do Sul para aquecimento de $4\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Para R30mm, a variabilidade interna predomina sobre a região Sul e Paraguai (0,015 - 0,05) e a variabilidade inter-modelos se equipara a ela no SWL 1.5, expandindo para parte do SEB e chegando a ser 10 vezes superior a variabilidade interna no SWL 4.0 para essa área e para a região da Cordilheira dos Andes. Na região central da AS, a variabilidade interna mais pronunciada fica em torno de 4,0 - 5,0 mm para Rx5Day, e as incertezas dos modelos partem de regiões pontuais e valores semelhantes quando aquecimento de $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, se expandindo para o S/SEB e parte do CO para SWL 4.0. Por fim, o índice R95p foi o que apresentou as maiores extensões de área com

variabilidades altas, sendo a interna predominante em parte do SE e CO, Sul do Brasil, Uruguai, Paraguai, Bolívia e porções dos Andes (> 30 mm) e as incertezas relacionadas aos modelos mais limitadas ao S/SEB e parte norte dos Andes no SWL 1.5. Quando o aquecimento atinge 4 °C, as incertezas dos modelos mostram-se superiores a 300 mm sobre a América do Sul como um todo (exceto na Argentina, norte do Chile, área central do NE e fronteira Brasil-Bolívia), significando que podem aumentar cerca de 10 vezes com o acréscimo de $1,5$ °C para 4 °C, e corresponder a 90% das incertezas totais nessas áreas. Assim, à medida que o nível de aquecimento aumenta, o modelo vai sendo direcionado, fazendo com que a variabilidade interna torna-se decrescente. Em contrapartida, outras variabilidades vão sendo geradas, uma vez que a caracterização da chuva vai se tornando mais deficiente, devido ao distanciamento das condições meteorológicas do presente que foram utilizadas no modelo, aumentando assim as incertezas do modelo.

Figura 6.1 – Variabilidade interna (linha 1) e variabilidade dos modelos nas projeções sob acréscimo de temperatura de 1,5 °C (linha 2), 2 °C (linha 3) e 4 °C (linha 4), referentes aos índices de precipitação CDD (a, f, k, p), R10mm (b, g, l, q), R30mm (c, h, m, r), R95p (d, i, n, s) e Rx5Day (e, j, o, t). A área sem preenchimento no extremo sul da AS se deve aos dados observados do CHIRPS estarem disponíveis apenas até 50°S.

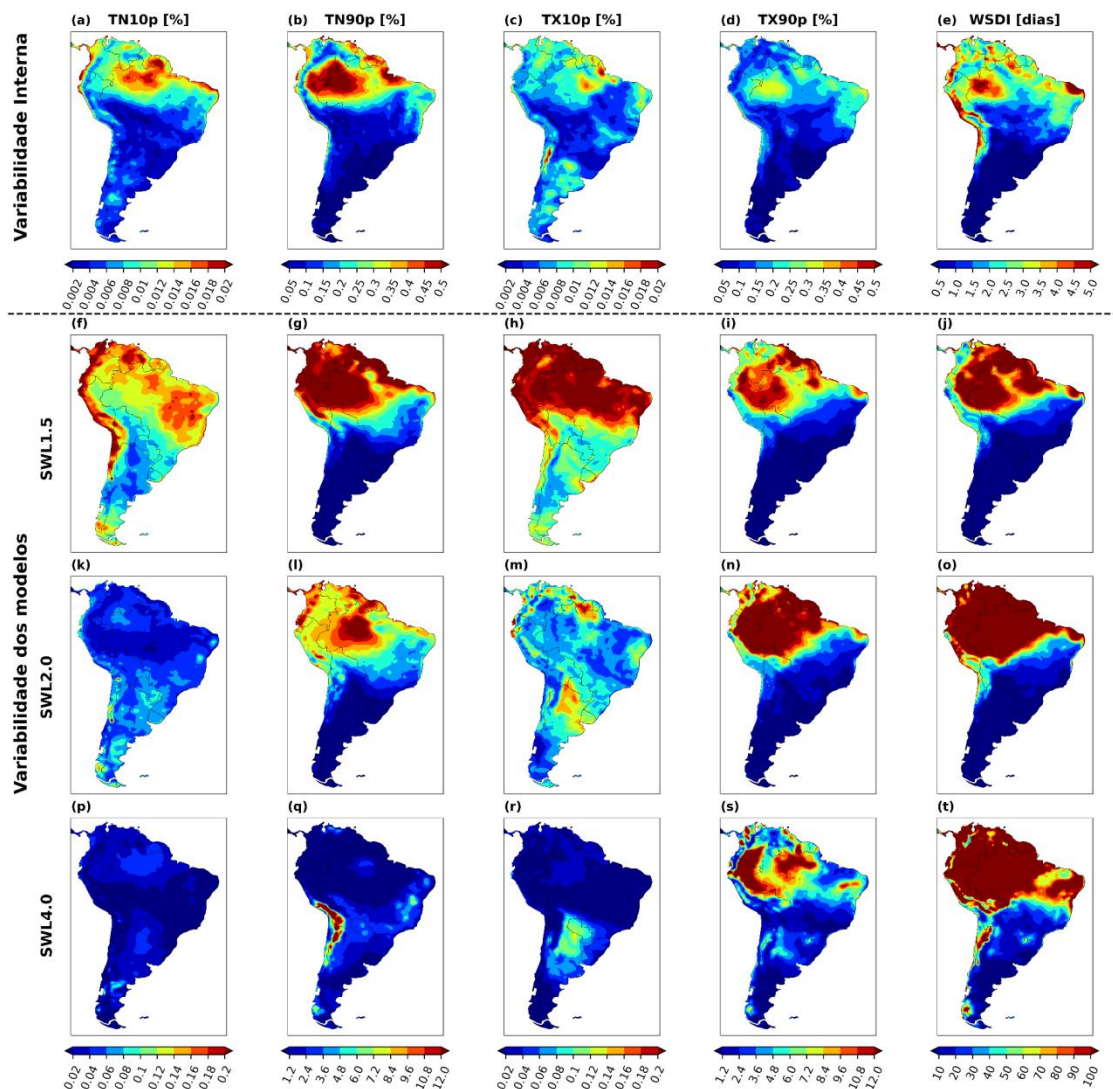


Em relação aos índices de temperatura (Figura 6.2), a variabilidade interna é pequena, porém, mostra-se mais pronunciada sobre a região equatorial, principalmente para TN90p e WSDI, onde os valores superam 0,5% de noites quentes e chegam a 5 dias de duração das ondas de calor no leste da AMZ. Já as menores variabilidades internas se dão sobre o Sul do Brasil, Uruguai, Paraguai, Argentina e Chile, em destaque para os extremos TN90p ($< 0,05\%$), TX90p ($< 0,05\%$) e WSDI ($< 0,5$ dia). Referindo-se à variabilidade dos modelos, os resultados mostram maiores incertezas sobre a região

tropical, mais intensamente também para TN90p ($> 12\%$) e WSDI (> 100 dias) em SWL 1.5. Para TN10p, estas incertezas se destacam sobre a Cordilheira dos Andes ($> 0,2\%$) e NEB (0,16% - 0,18%) quando o aquecimento é de 1,5 °C e vão diminuindo com o SWL, chegando a ser inferior a 0,02% no NEB, S/SEB, CO e áreas adjacentes no SWL 4.0. Para TX10p, o comportamento dado os níveis de aquecimento é semelhante ao TN10p, diferindo apenas na abrangência e intensidade da incerteza dos modelos, a qual tem variabilidades superiores a 0,2% sobre toda a região tropical em SWL 1.5. No que se refere a TN90p, as incertezas diminuem consideravelmente sobre a região tropical (de $> 12\%$ para $< 1,2\%$) e aumentam ligeiramente na porção sul da AS (de $< 1,2\%$ para 1,2 - 3,6) com o aquecimento de 1,5 °C para 4 °C. Já para TX90p, os modelos apresentam variabilidade de 12% sobre algumas regiões no norte da AS em SWL 1.5, expandindo essa área quando aquecimento de 2 °C e voltando a diminuir sua abrangência no SWL 4.0. Já no restante do continente, as incertezas mostram-se moderadamente crescentes com o nível de aquecimento. Por fim, WSDI aponta crescimento da variabilidade inter-modelos com o incremento de temperatura (1,5 °C para 4 °C) sobre toda a América do Sul.

Blásquez e Nuñez (2013) utilizaram a mesma metodologia para quantificar as incertezas sobre a América do Sul, porém utilizando as projeções de temperatura e precipitação dos modelos do CMIP3 e CMIP5. Para a precipitação, os resultados mostram que a maior variabilidade dos modelos está concentrada na região equatorial em todas as estações do ano e também é consideravelmente maior que a variabilidade interna, aumentando sua abrangência e magnitude em direção às últimas décadas do século XXI. Esse comportamento pode estar associado à capacidade de representação correta das condições atmosféricas, devido à falta de dados, ao entendimento incompleto dos processos atmosféricos sobre a região equatorial. Para a temperatura da superfície, as projeções mostram as maiores incertezas dos modelos sobre a região Amazônica, concordando com os atuais resultados para os extremos de temperatura. Porém, a tendência mostrada é que essas incertezas dos modelos aumentarão com as décadas, diferentemente do presente estudo, o qual mostra diminuição dos extremos TN10p, TN90p, TX10p e TX90p quando o aquecimento alcançar os 4 °C. No que diz respeito à contribuição de cada fonte de variabilidade no total de incertezas, os resultados mostram-se em concordância com o trabalho anterior.

Figura 6.2 – Variabilidade interna (linha 1) e variabilidade dos modelos nas projeções sob acréscimo de temperatura de 1,5 °C (linha 2), 2 °C (linha 3) e 4 °C (linha 4), referentes aos índices de temperatura TN10p (a, f, k, p), TN90p (b, g, l, q), TX10p (c, h, m, r), TX90p (d, i, n, s) e WSDI (e, j, o, t).



Para verificar o predomínio de cada uma das variabilidades no total de incertezas, obteve-se o peso relativo da variabilidade dos modelos para cada SWL. Para os extremos de precipitação (Figura 6.3), o peso da variabilidade interna diminui com o tempo, indicando que ela é importante nas projeções para SWL 1.5. Porém, à medida que vai havendo o aquecimento, a variabilidade interna decai e a incerteza dos modelos se torna dominante no total de incertezas, sendo superior a 90% em quase todo o território de estudo. Essas características também foram observadas por Blásquez e Nuñez (2013) para precipitação e por Chen et al. (2014) para precipitação e alguns extremos relacionados.

Quanto aos extremos de temperatura (Figura 6.4), como a variabilidade interna tem magnitude bastante inferior à inter-modelos, mesmo no SWL 1.5, as incertezas dos modelos apresentam-se dominantes, superando 90% na AS. Essas incertezas tendem a se manterem ou aumentarem seu peso quando há acréscimo de temperatura para TX90p e WSDI. Porém, para os demais, a proporção da variabilidade dos modelos apresentou diminuição, mostrando que no SWL 4.0 representam 60% - 70% do total de incertezas nas projeções de TN10p sobre o norte da AS e Brasil, de 30% a 60% para TN90p sobre a região tropical e entre 60% e 80% de grande parte da porção norte da AS e extremo sul do continente para TX10p. Esse comportamento difere em parte dos resultados de Blásquez e Nuñez (2013) e Chen et al. (2014), uma vez que esses encontraram predomínio da variabilidade interna nas primeiras décadas e crescente domínio das incertezas dos modelos no total de incertezas em direção ao final do século XXI para a temperatura.

Figura 6.3 – Peso relativo da variabilidade dos modelos no total de incertezas para os índices de precipitação CDD (*a, f, k*), R10mm (*b, g, l*), R30mm (*c, h, m*), R95p (*d, i, n*) e Rx5Day (*e, j, o*) havendo acréscimo de temperatura de 1,5 °C (linha superior), 2 °C (linha central) e 4 °C (linha inferior). A área sem preenchimento no extremo sul da AS se deve aos dados observados do CHIRPS estarem disponíveis apenas até 50°S.

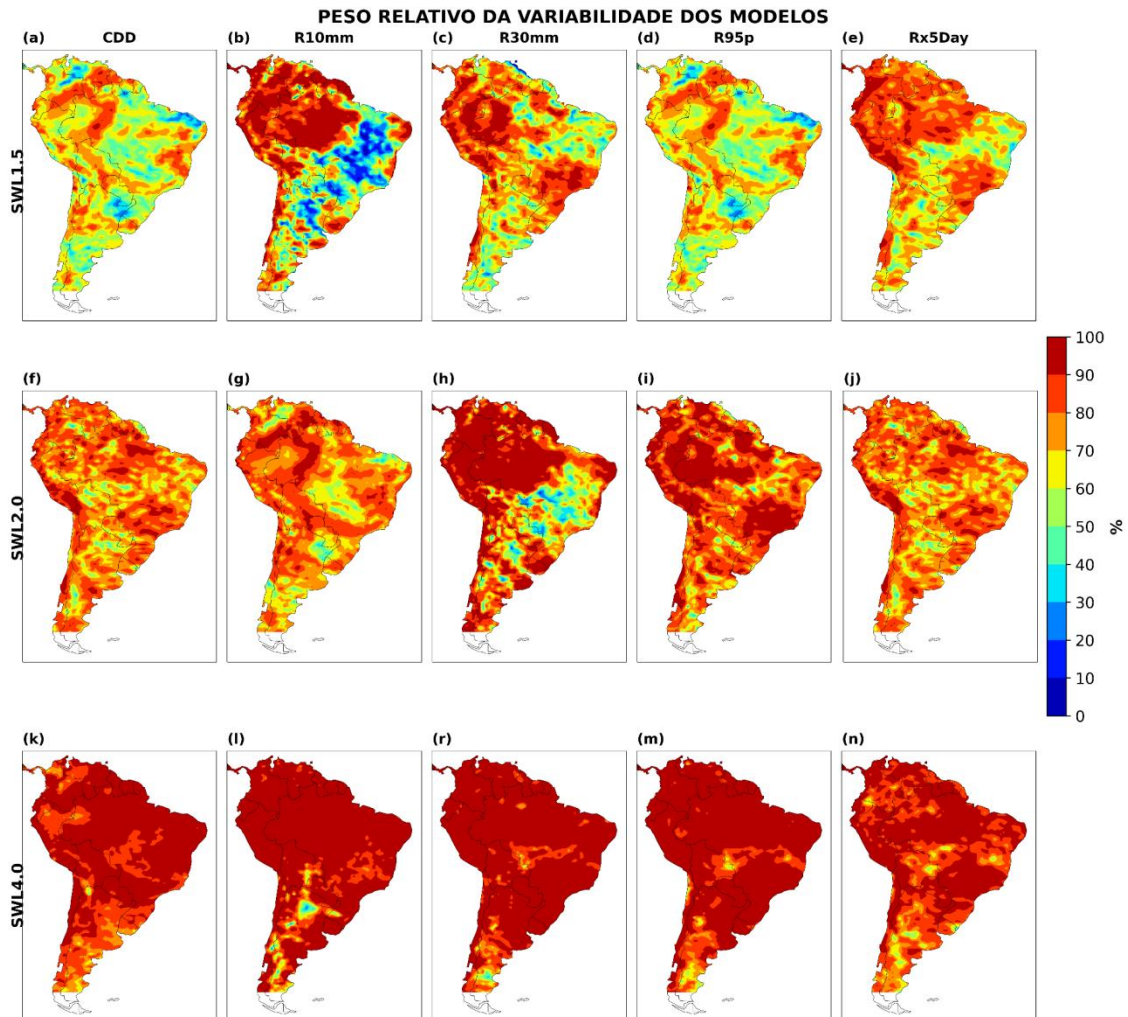
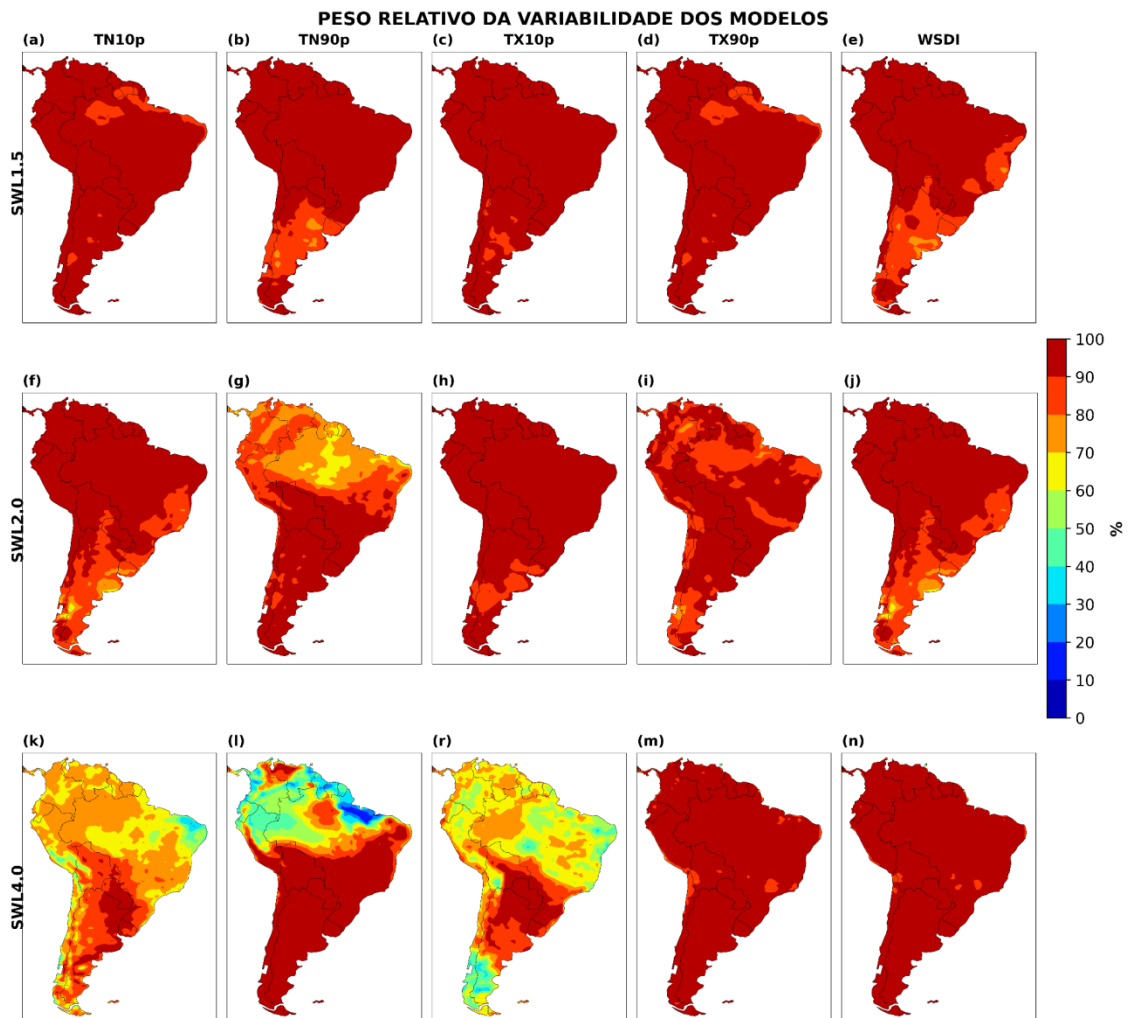


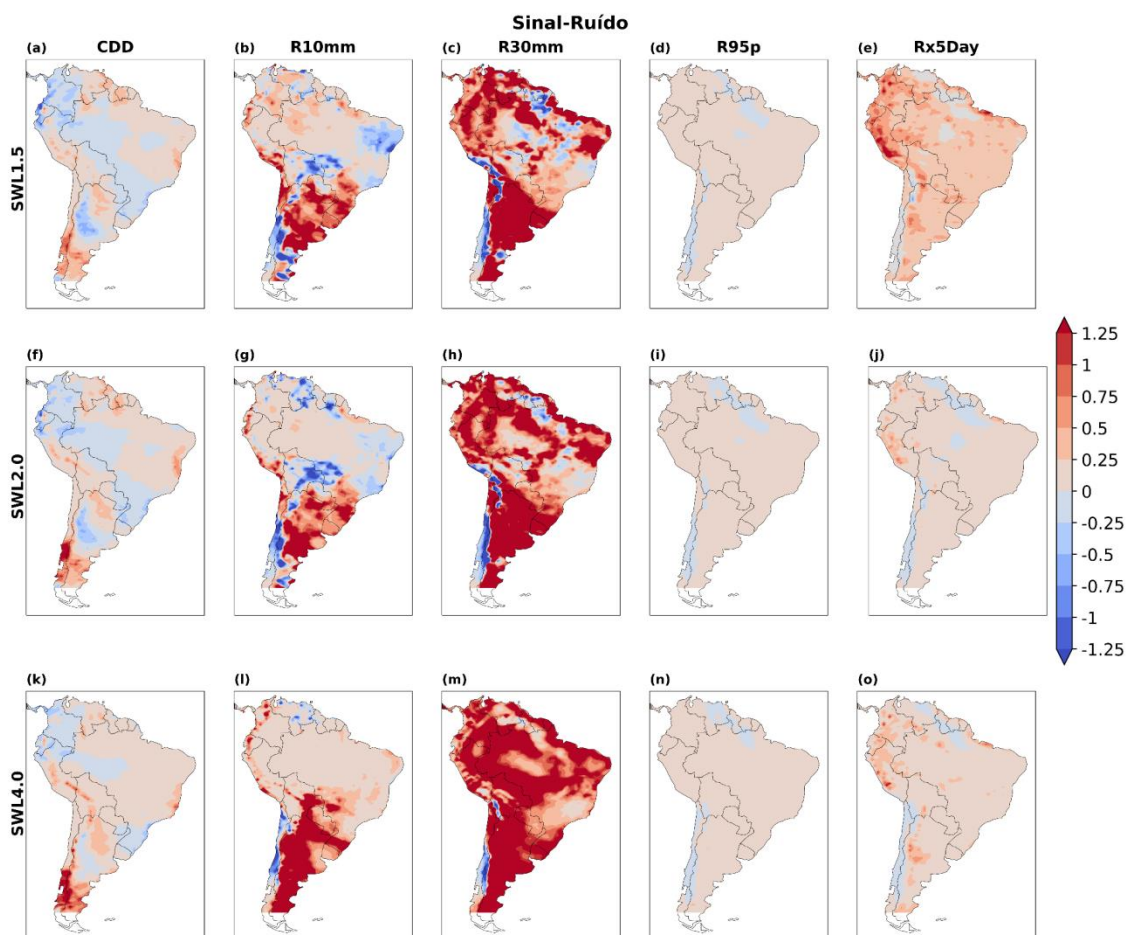
Figura 6.4 – Peso relativo da variabilidade dos modelos no total de incertezas para os índices de temperatura TN10p (a, f, k), TN90p (b, g, l), TX10p (c, h, m), TX90p (d, i, n) e WSDI (e, j, o) havendo acréscimo de temperatura de 1,5 °C (linha superior), 2 °C (linha central) e 4 °C (linha inferior).



Comumente utilizada para analisar a confiabilidade das projeções de extremos climáticos, a relação Sinal-Ruído (S/R) foi obtida, assumindo-se que o Sinal é a mudança média dos índices (diferença entre projeção em cada SWL e simulação no período de referência 1981-2010) e o Ruído refere-se à incerteza total, dependendo fortemente da variabilidade interna e dos modelos. Valores absolutos maiores que 1 representam áreas com alta confiabilidade das projeções. Para CDD (Figura 6.5), nota-se S/R tanto positivos quanto negativos sobre o continente sul-americano nos três níveis de aquecimento, indicando ambos os sinais da mudança; porém, os valores são pequenos e não ultrapassam 0,25, exceto sobre uma pequena região no sul do Chile (> 1), indicando que há maior confiabilidade das projeções nesta área para SWL 4.0. Para R95p e Rx5Day, os resultados mostram +0,25 de S/R sobre praticamente toda a área de

estudo nos SWLs, salvo para aquecimento de 1,5 °C para Rx5Day, onde os valores ficam entre 0,25-0,5 e ultrapassam 1 apenas em parte do Peru. Já para R10mm, partes do Sul do Brasil, Paraguai, Argentina e Chile apresentam S/R acima de 1, indicando que, nessas áreas, a robustez das mudanças projetadas é maior e expande espacialmente com o SWL. O índice de precipitação que apresentou os maiores S/R sobre grande parte da AS e, conseqüentemente, alta confiabilidade das projeções foi o R30mm, no qual também ficou evidente um aumento da sua abrangência no SWL 4.0, estando com S/R abaixo de 1 apenas no SE e parte do CO, S e AMZ.

Figura 6.5 – Relação Sinal-Ruído (S/R) para os índices de precipitação CDD (a, f, k), R10mm (b, g, l), R30mm (c, h, m), R95p (d, i, n) e Rx5Day (e, j, o). As linhas (de cima a baixo) indicam os níveis de aquecimento de 1,5 °C, 2 °C e 4 °C. Valores negativos de S/R indicam que as projeções da variável climática deverão diminuir.

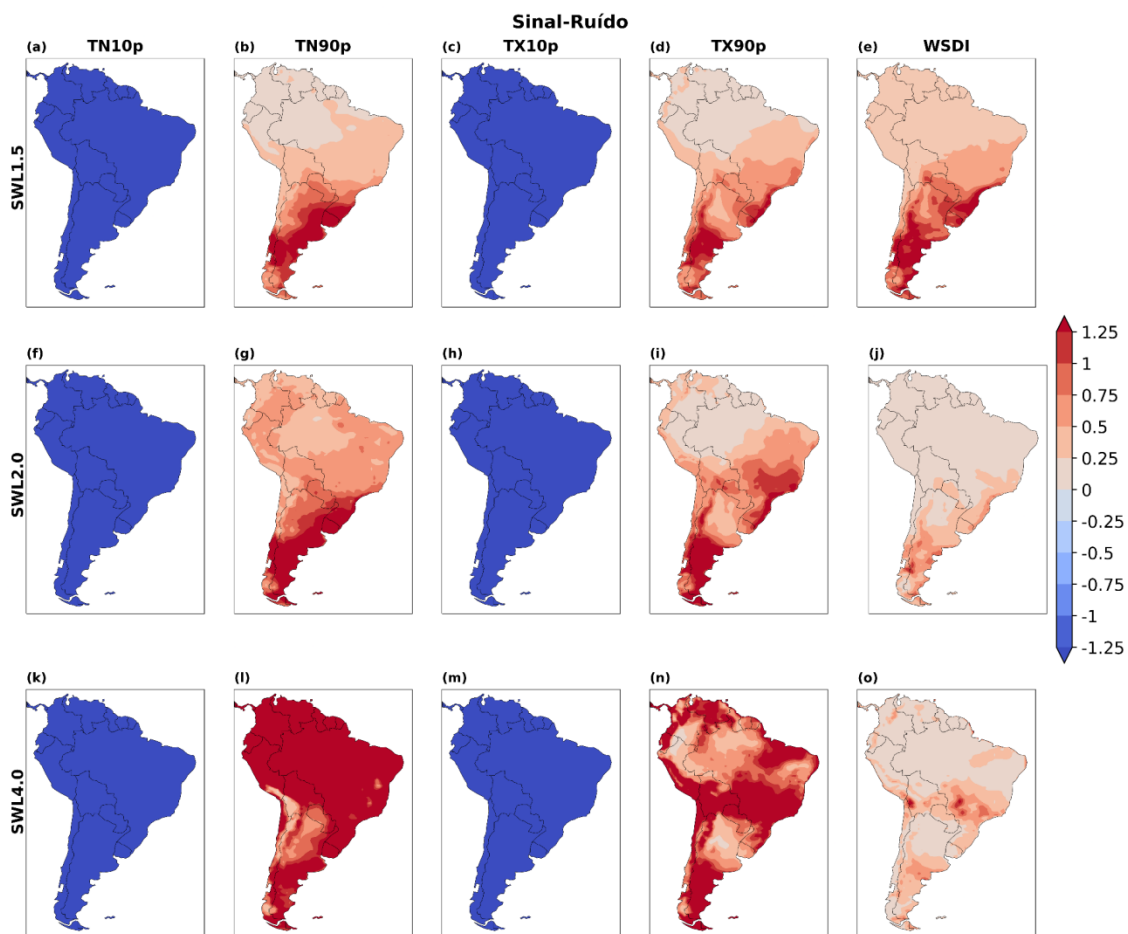


Quando analisados os índices de temperatura (Figura 6.6), nota-se alta confiabilidade nas projeções dos extremos frios (TN10p e TX10p) em todos os níveis de aquecimento, uma vez que ambos apresentaram valores absolutos de S/R superiores a 1 sobre toda

AS. Nestes casos, os S/Rs são negativos, indicando mudanças robustas, porém diminuição da variável climática. Já os extremos quentes evidenciam suas mudanças positivas, porém WSDI possui S/R acima de 1 apenas no Sul do Brasil, Uruguai e parte da Argentina para SWL 1.5, não alcançando tal confiabilidade nos demais níveis de aquecimento. Isso pode estar ocorrendo

Já para TN90p e TX90p, os resultados mostram robustez para áreas semelhantes a esta última quando aquecimento de 1,5 °C e 2 °C, sendo crescente e alcançando S/R acima de 1 sobre a maior parte da AS (TN90p) e faixa central, e extremos norte e sul do continente (TX90p) quando SWL 4.0, evidenciando assim alta confiabilidade das mudanças projetadas para estes índices.

Figura 6.6 – Relação Sinal-Ruído (S/R) para os índices de temperatura TN10p (a, f, k), TN90p (b, g, l), TX10p (c, h, m), TX90p (d, i, n) e WSDI (e, j, o). As linhas (de cima a baixo) indicam os níveis de aquecimento de 1,5 °C, 2 °C e 4 °C. Valores negativos de S/R indicam que as projeções da variável climática deverão diminuir.



Como mostrado pelos resultados, há grande confiabilidade nas mudanças de extremos de temperatura projetadas para o futuro, principalmente quando referentes ao SWL 2.0 e SWL 4.0. Também, sabe-se que essas mudanças são consideradas significativamente robustas e que sofrerão intensificação e expansão com o SWL. Esse aumento de temperatura em conjunto com as projeções de longos períodos de estiagem, principalmente em áreas como o NEB, podem acarretar secas irreversíveis e degradação do solo, como evidenciado por Marengo et al. (2020) e Pilotto et al. (2023). Estes autores mostraram que há grande probabilidade do aquecimento ultrapassar os 4 °C nos próximos 30-40 anos, e caso isso ocorra, a população e as espécies locais sofrerão fortemente os impactos e serão necessárias medidas de adaptação às novas características e clima da região, uma vez que ocorrerão mudanças definitivas e preocupantes.

Também, analisando a precipitação extrema e os riscos de desastres hidro-geometeorológicos no futuro, Marengo et al. (2021) mostraram que as regiões mais vulneráveis às mudanças nas médias e na intensificação da precipitação são as áreas mais populosas e marginalizadas no geral, ficando ainda mais expostos às consequências graves caso o aquecimento atinja 2 °C. Assim, faz-se necessário e de fundamental importância buscar esforços políticos e econômicos para limitar o aquecimento global em 1,5 °C, ou no mais pessimista cenário, em 2 °C, numa tentativa de impedir essas mudanças abruptas irreversíveis e de amenizar os impactos sobre a população, freando as consequências na média e nos extremos sobre a América do Sul.

7 CONCLUSÕES

Os impactos das mudanças climáticas já são sentidos em todo o globo e as projeções para o século XXI evidenciam grandes mudanças nas médias e nos extremos climáticos. Regiões como a América do Sul são consideradas de alta vulnerabilidade a essas mudanças, uma vez que não possuem estrutura socioeconômica e física para sofrer suas consequências, principalmente relacionadas à intensificação dos eventos extremos. Então, faz-se necessário entender o comportamento presente e as projeções futuras dos extremos de precipitação e temperatura, conhecendo suas variações e incertezas associadas. Assim, este estudo teve como objetivo avaliar as simulações e projeções de eventos extremos climáticos para a AS nos níveis de aquecimento de 1,5 °C, 2 °C e 4 °C, identificando a acurácia dos modelos do HELIX em representá-los, a significância das mudanças e as incertezas inerentes às projeções futuras.

As simulações individuais mostram semelhança entre as rodadas de um mesmo modelo, porém disparidades quando comparadas as rodadas de um modelo com o outro, sendo muitas vezes divergentes em sinal sobre determinadas regiões. Quanto aos ensembles, os resultados mostram para EC-EARTH3-HR superestimativas de CDD sobre a região central do Brasil e de R10mm, R95p e Rx5Day na região da Cordilheira dos Andes. Já as maiores subestimativas dos extremos de precipitação (exceto CDD) podem ser encontradas na faixa equatorial, e também sobre a AMZ para R95p. Para HadGEM3, os menores vieses de CDD estão sobre o semiárido do NEB e, em relação aos demais índices de precipitação, sobre a região equatorial e AMZ (concordando com ensemble EC-EARTH3-HR); enquanto as superestimativas de R95p e Rx5Day podem ser vistas no S/SEB, Uruguai, Paraguai e norte da Argentina.

Em relação aos extremos de temperatura, o ensemble EC-EARTH3-HR apresentou subestimativas consideráveis de TN10p e TN90p sobre o NEB, e de TX10p, TX90p e WSDI na região equatorial quando comparados às reanálises do ERA-5. Na comparação com o MERRA-2, as maiores subestimativas de TX90p e WSDI se deram sobre a AMZ, enquanto as superestimativas mais relevantes foram encontradas na AMZ e norte da AS para noites frias e quentes. Em relação ao ensemble HadGEM3, os menores vieses dos extremos TNx e TXx estão sobre quase toda a AS quando comparados ao ERA-5 (exceto AMZ para comparações com MERRA-2). Já para WSDI, observou-se

uma faixa NW-SE de superestimativas dos valores mostrados pelo ERA-5 e vieses baixos em relação ao MERRA-2.

Quanto às simulações do ensemble HELIX, onde as 13 rodadas de ambos os modelos são consideradas, os valores dos índices extremos de precipitação e temperatura são suavizados pela média e seus vieses diminuídos. Para verificar estatisticamente a acurácia dos modelos do HELIX em simular as observações e reanálises, o diagrama de Taylor foi utilizado. De maneira geral, as maiores acurácias de todos os extremos, exceto CDD e TN10p, foram obtidas pelas rodadas do EC-EARTH3-HR. Os índices WSDI e CDD foram, dentre todos, os melhores representados, em destaque para a AMZ, na qual as simulações ficaram mais próximas às observações (e reanálises). Apesar de pequena a diferença, os índices de temperatura têm os menores vieses e, conseqüentemente, melhores desempenhos em simular o presente quando comparados aos de precipitação.

A Avaliação dos modelos mostra que os índices extremos de temperatura são melhor representados pelos modelos do HELIX do que os extremos de precipitação. Essa menor habilidade dos modelos em simular os índices, principalmente os de precipitação, pode ser resultante das deficiências nas parametrizações e na representação de suas propriedades; da natureza secundária dos índices, uma vez que são derivados estatisticamente das variáveis primárias de precipitação e temperatura, possuindo qualidade inferior das simulações; da utilização de reanálises ao invés de dados provenientes de estações meteorológicas, acarretando maiores vieses; também à modificação da resolução dos dados para fins de comparação dos modelos.

Comparando os ensembles dos modelos, as mudanças nas projeções são mais intensas e pronunciadas para HadGEM3 do que para EC-EARTH3-HR. Para as projeções de extremos de precipitação, os modelos do HELIX apontam escassez de chuvas sobre o NEB e leste da AMZ, aumento de CDD no Platô brasileiro e região andina, enquanto os maiores índices pluviométricos são esperados para o oeste da AMZ, Sul do Brasil e norte argentino. Porém, nenhum desses índices de precipitação apresentaram mudanças robustas em relação ao período de referência (1981-2010), mostrando fração de área com mudanças não-significativas em 100% ou próxima a totalidade da AS nos 3 SWLs. Para evidenciar esses resultados, as PDFs mostram as maiores mudanças sobre a AMZ

para todos os extremos de precipitação, podendo ser 4 vezes superior à variabilidade interanual quando SWL 4.0.

As projeções de extremos de temperatura evidenciaram aumento dos extremos quentes (TN90p, TX90p, WSDI) e diminuição dos eventos frios (TN10p, TX10p), principalmente sobre a região tropical quando aquecimento de 1,5 °C, onde as anomalias serão maiores. Essas mudanças serão intensificadas e expandidas na direção sul da AS com o aumento do nível de aquecimento, atingindo seus maiores valores em 4 °C. Esses extremos também mostraram mudanças não-significativas sobre a AS para a maior parte quando SWL 1.5. À medida que SWL aumenta, a fração de área com mudanças robustas cresce, exceto para TN10p e TX10p, nos quais a porcentagem diminui, em especial sobre a AMZ e NEB. Já para aquecimento de 4 °C, todos apresentaram anomalias robustas sobre a área, salvo WSDI, o qual a robustez só foi observada na porção norte da AS.

As incertezas nas projeções dos extremos de precipitação mostraram maior variabilidade interna sobre parte do SEB, CO e litoral norte do NEB para CDD, e no S/SEB e CO para Rx5Day, sendo mais pronunciadas para R95p. Já a variabilidade dos modelos apresenta aumento com o SWL e se torna dominante no total de incertezas quanto maior for o aquecimento, chegando a 90% no SWL 4.0. Para os índices de temperatura, tanto a variabilidade interna quanto a dos modelos são maiores na região tropical, a qual engloba a AMZ, e, no geral, as menores incertezas estão sobre a Argentina. As variabilidades inerentes aos modelos e a proporção dessa incerteza diminuem com o SWL (diferindo dos extremos de precipitação), exceto para TX90p e WSDI, onde tendem a manter ou aumentar seu peso no total de incertezas quando há incremento de temperatura.

Finalmente, as análises de Sinal-Ruído mostram a relação entre a mudança futura do índice extremo e o total de incertezas (variabilidade interna e variabilidade dos modelos), indicando a confiabilidade das projeções, a qual mostrou-se alta para R30mm sobre grande parte da AS, aumentando sua abrangência no SWL 4.0. Já os índices de temperatura que indicaram alta confiabilidade ($S/R > 1$) na diminuição de suas mudanças sobre todo o continente nos 3 níveis de aquecimento foram TN10p e TX10p. Já para TN90p e TX90p, a porção sul da AS foi considerada robusta quando SWL 1.5 e SWL 2.0, sendo expandida a área de abrangência e a confiabilidade sobre a faixa central e

maior parte da AS para TN90p, e e extremos norte e sul da área para TX90p, ambas para aquecimento de 4 °C.

As regiões com maiores densidades demográficas, como o S/SEB e a região costeira do NEB estão mais vulneráveis a deslizamentos de terra e inundações, uma vez que concentram populações marginalizadas no geral e não possuem infraestrutura para suportar mudanças tão marcantes. Caso o aquecimento alcance os 2 °C, a situação nessas regiões pode se agravar ainda mais e gerar consequências devastadoras na geração energética, na segurança hídrica e alimentar, na saúde da população local e nos biomas. Dessa maneira, faz-se necessário monitorar e prever os riscos associados a esses eventos, principalmente relacionados aos extremos climáticos, a fim de aperfeiçoar o conhecimento a respeito e emitir alertas preventivos.

Este trabalho reforça ainda mais o sinal e a severidade das mudanças no clima e nos extremos no futuro, destacando a importância dos esforços dos tomadores de decisões para introduzir políticas públicas que reduzam os causadores dessas mudanças e amenizem seus impactos, a fim de limitar o aquecimento em 1,5 °C e 2 °C, evitando o agravamento dos extremos e protegendo a vida humana e os ecossistemas existentes.

Sugestões para trabalhos futuros:

- Analisar sazonalmente as projeções dos extremos climáticos de precipitação e temperatura sobre a América do Sul. Os maiores impactos do aumento de extremos podem ser observados durante a Primavera e o Verão, reforçando a importância de buscar compreender melhor seus comportamentos durante o ano.
- Utilizar os dados dos modelos do CMIP6 para os cenários SSPs, a fim de observar os extremos climáticos no futuro dado diferentes níveis de aquecimento, condições socioeconômicas, medidas de adaptação e mitigação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALEXANDER, M. Extratropical Air-Sea Interaction, Sea Surface Temperature Variability, and the Pacific Decadal Oscillation. In: SUN, D.-Z.; BRYAN, F. **Climate Dynamics: Why Does Climate Vary?**. Washington: American Geophysical Union, 2010. p. 123-149.

ALEXANDER, L.; HEROLD, N. ClimPACT2 Indices and software. A document prepared on behalf of The Commission for Climatology (CCI) Expert Team on Sector-Specific Climate Indices (ET-SCI), ARC Centre of Excellence for Climate System Science, The University of New South Wales, Sydney, Australia, 2016. pp. 46. https://awi.eprints-hosting.org/id/eprint/49274/1/ClimPACTv2_manual.pdf

ALFIERI, L.; BISSELINK, B.; DOTTORI, F.; NAUMANN, G.; ROO DE, A.; SALAMON, P.; WYSER, K.; FEYEN, L.. Global projections of river flood risk in a warmer world. **Earth's Future**, v. 5, n. 2, p. 171–182, 2017.

ALMAZROUI, M.; ASHFAQ, M.; ISLAM, M. N.; RASHID, I. U.; KAMIL, S.; ABID, M. A.; O'BRIEN, E.; ISMAIL, M.; REBOITA, M. S.; SÖRENSON, A. A.; ARIAS, P. A.; ALVES, L. M.; TIPPETT, M. K.; SAEED, S.; HAARSMA, R.; DOBLAS-REYES, F. J.; SAEED, F.; KUCHARSKI, F.; NADEEM, I.; SILVA-VIDAL, Y.; RIVERA, J. A.; EHSAN, M. A.; MARTÍNEZ-CASTRO, D.; MUÑOZ, Á. G.; ALI, M. A.; COPPOLA, E.; SYLLA, M. B.; Assessment of CMIP6 Performance and Projected Temperature and Precipitation Changes Over South America. **Earth Systems and Environment**. v. 5, p. 155-183, 2021.

ALVARENGA, L. A. Precipitação no sudeste brasileiro e sua relação com a Zona de Convergência do Atlântico Sul. **Revista Agrogeoambiental**, v. 2, n. 2, p. 1-7, 2012.

AVILA-DIAZ, A.; ABRAHÃO, G.; JUSTINO, F.; TORRES, R. R.; WILSON, A.; Extreme climate indices in Brazil: evaluation of downscaled earth system models at high horizontal resolution. **Climate Dynamics**, v. 54, p. 5065-5088, 2020.

AVILA-DIAZ, A.; TORRES, R. R.; ZULUAGA, C. F.; CERÓN, W. L.; OLIVEIRA, L.; BENEZOLI, V.; RIVERA, I. A.; MARENGO, J. A.; WILSON, A. B.; MEDEIROS, F.; Current and Future Climate Extremes Over Latin America and Caribbean: Assessing Earth System Models from High Resolution Model Intercomparison Project (HighResMIP). **Earth Systems and Environment**. v. 7, p. 99-130, 2023.

BETTS, R. A.; ALFIERI, L.; BRADSHAW, C.; CAESAR, J.; FEYEN, L.; FRIEDLINGSTEIN, P.; GOHAR, L.; KOUTROULIS, A.; LEWIS, K.; MORFOPOULOS, C.; PAPADIMITRIOU, L.; RICHARDSON, K. J.; WYSER, K.. Changes in climate extremes, fresh water availability and vulnerability to food insecurity projected at 1.5 °C and 2 °C global warming with a higher-resolution global climate model. **Royal Society**, p. 2–27, 2018.

BJERKNES, J. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific. **Monthly Weather Review**, v. 97, p. 163–172, 1969.

BLÁZQUEZ, J.; NUÑEZ, M. N.. Analysis of uncertainties in future climate projections for South America: Comparison of WCRP-CMIP3 and WCRP-CMIP5 models. **Climate Dynamics**, v. 41, n. 3–4, p. 1039–1056, 2013.

BRITO, A. L.; VEIGA, J. A. P.; CORREIA, F. W. S.; MICHILES, A. A.; CAPISTRANO, V. B.; CHOU, S. C.; LYRA, A. L.; MEDEIROS, G. Impacts of greenhouse gases and deforestation in Amazon Basin climate extreme indices. **Climate Research**, v. 88, p. 39-56, 2022.

CAI, W., MCPHADEN, M.J., GRIMM, A.M.; RODRIGUES, R. R.; TASCETTO, A. S.; GARREAU, R. D.; DEWITTE, B.; POVEDA, G.; HAM, Y-G.; S, A.; NG, B.; ANDERSON, W.; WANG, G.; GENG, T.; JO, H-S.; MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; OSMAN, M.; LI, S.; KARAMPERIDOU, C.; TAKAHASHI, K.; VERA, C. Climate impacts of the El Niño–Southern Oscillation on South America. **Nat Rev Earth Environ**, v. 1, p. 215–23, 2020.

CHEN, H.; SUN, J.; CHEN, X.. Projection and uncertainty analysis of global precipitation-related extremes using CMIP5 models. **International Journal of Climatology**, v. 34, n. 8, p. 2730–2748, 2014.

CHOU, S. C.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DEREZYNSKI, C.; PILOTTO, I.; GOMES, J.; BUSTAMANTE, J.; TAVARES, P.; SILVA, A.; RODRIGUES, D.; CAMPOS, D.; CHAGAS, D.; SUEIRO, G.; SIQUEIRA, G.; MARENGO, J. Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Downscaling Scenarios. **American Journal of Climate Change**, v. 3, p. 512-525, 2014.

COLLINS, M.; AN, S.-I.; CAI, W.; GANACHAUD, A.; GUILYARDI, E.; JIN, F.-F.; JOCHUM, M.; LENGAIGNE, M.; POWER, S.; TIMMERMANN, A.; VECCHI, G.; WITTENBERG, A. The impact of global warming on the tropical Pacific Ocean and El Niño. **Nature Geoscience**, v. 3, p. 391-397, 2010.

COSTA, M. S., LIMA, K. C., ANDRADE, M. M., GONÇALVES, W. A.. Trends observed in precipitation extremes over the semiarid region of Northeast Brazil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 8, n. 5, p. 1321–1334, 2015.

DEBORTOLI, N. S.; CAMARINHA, P. I. M.; MARENGO, J. A.; RODRIGUES, E. R. R.. An index of Brazil’s vulnerability to expected increases in natural flash flooding and landslide disasters in the context of climate change. **Nat Hazards**, [s. v.], p. 1-25, 2017.

DEMORY, M. E.; VIDALE, P. L.; ROBERTS, M. J.; BERRISFORD, P.; STRACHAN, J.; SCHIEMANN, R.; MIZIELINSKI, E. M. S.. The role of horizontal resolution in simulating drivers of the global hydrological cycle. **Climate Dynamics**, v. 42, n. 7–8, p. 2201–2225, 2013.

DIAMANTAKIS, M.; FLEMMING, J. Global mass fixer algorithms for conservative tracer transport in the ECMWF model. **ECMWF Technical Memoranda**, n. 713, p. 1-31, 2013.

- DOSIO, A. Projections of climate change indices of temperature and precipitation from an ensemble of bias-adjusted high-resolution EURO-CORDEX regional climate models. **Journal of Geophysical Research**, v. 121, n. 10, p. 5488–5511, 2016.
- DOSIO, A.; FISCHER, E. M. Will Half a Degree Make a Difference? Robust Projections of Indices of Mean and Extreme Climate in Europe Under 1.5 °C, 2 °C, and 3 °C Global Warming, **Geophysical Research Letters**, v. 45,9 p. 35-944, 2018.
- DOSIO, A.; LORENZO, M.; FISCHER, E.M.; WYSER, K. Extreme heat waves under 1.5 °C and 2 °C global warming. **Environmental Research Letters**, v. 13, n. 5, 2018.
- FORBES, R; TOMPKINS, A. M.; UNTCH, A. A new prognostic bulk microphysics scheme for the IFS. **ECMWF Technical Memoranda**, n. 649, p. 1-28, 2011.
- FRICH, P.; ALEXANDER, L. V.; DELLA-MARTA, P.; GLEASON, B.; HAYLOCK, M.; TANK, A. M. G. K.; PETERSON, T. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. **Climate Research**, v. 19, p. 193–212, 2002.
- FUNK, C.; PETERSON, P.; LANDSFELD, M.; PEDREROS, D.; VERDIN, J.; SHUKLA, S.; HUSAK, G.; ROWLAND, J.; HARRISON, L.; HOELL, A.; MICHAELSEN, J.. The climate hazards infrared precipitation with stations - A new environmental record for monitoring extremes. **Scientific Data**, v. 2, n. June 2016, 2015.
- GAN, M. A.; KOUSKY, V. E.; ROPELEWSKI, C. F.; The South America Monsoon Circulation and Its Relationship to Rainfall over West-Central Brazil. **Journal of Climate**. v. 17, n. 1, p. 47-66. 2004;
- GARCIA, S. R.; KAYANO, M. T. Determination of the onset dates of the rainy season in central amazon with equatorially antisymmetric outgoing longwave radiation. **Theoretical and Applied Climatology**, Springer, v. 97, n. 3-4, p. 361-372, 2009.
- GELARO, R.; MCCARTY, W.; SUÁREZ, M. J.; TODLING, R.; MOLOD, A.; TAKACS, L.; RANGLES, C. A.; DARMENOV, A.; BOSILOVICH, M. G.; REICHLER, R.; WARGAN, K.; COY, L.; CULLATHER, R.; DRAPER, C.; AKELLA, S.; BUCHARD, V.; CONATY, A.; SILVA, A. M.; GU, W.; KIM, G.K.; KOSTER, R.; LUCCHESI, R.; MERKOVA, D.; NIELSEN, J. E.; PARTYKA, G.; PAWSON, S.; PUTMAN, W.; RIENECKER, M.; SCHUBERT, S. D.; SIENKIEWICZ, M.; ZHAO, B. The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2). *J. Climate*, v. 30, p. 5419-5454, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0758.1>. 2017.
- GELLENS, D.; ROULIN, E. Streamflow response of Belgian catchments to IPCC climate change scenarios. **Journal of Hydrology**, v. 210, p. 242-258, 1998.
- GIORGI, F. Climate Change Prediction. **Climatic Change**, v. 73, p. 239-265, 2005.

GIORGI, F.; MEARNS, L. O. Calculation of average, uncertainty range, and reliability of regional climate changes from AOGCM simulations via the “Reliability Ensemble Averaging” (REA) method. **Journal of Climate**, v. 15, p. 1141-1158, 2002.

GOHAR, L. K.; BERNIE, D.; LOWE, J. A. Evaluation of timing of SWLs from existing models. Report D2.1 to the High-End cLimate Impacts and eXtremes (HELIX), Project 603864, Seventh Framework Programme, United Kingdom, 2014.

GOUVEIA, C. D.. **Mudanças de extremos climáticos na América do Sul: projeções para o Século XXI e análise de incertezas**. 2018. 105 f. Universidade Federal de Itajubá, 2018.

GOUVEIA, C. D., RODRIGUES TORRES, R., MARENGO, J. A., & AVILA-DIAZ, A.; Uncertainties in projections of climate extremes indices in South America via Bayesian inference. **International Journal of Climatology**, v. 42, n. 14, p. 7362-7382. 2022.

GRIMM, A. M.; VERA, C. S.; MECHOSO, C. R. The South American Monsoon System. In: CHANG, C.-P.; WANG, B.; LAU, N.-C. G. **The Global Monsoon System: research and forecast**, p. 219-238, 2005.

GUIMARÃES, S. O.; COSTA, A. A.; VASCONCELOS JÚNIOR, F. das C.; SILVA, E. M. da; SALES, D. S.; ARAÚJO JÚNIOR, L. M. de; SOUZA, S. G. de. Projeções de mudanças climáticas sobre o nordeste brasileiro dos modelos do CMIP5 e do CORDEX. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 31, n. 3, p. 337-365, 2016.

HAERTER, J. O.; HAGEMANN, S.; MOSELEY, C.; PIANI, C. Climate model bias correction and the role of timescales. **Hydrol Earth Syst Sci**, v. 15, p. 1065–1079, 2011.

HARTMANN, D. L. **Global Physical Climatology**. San Diego: Academic Press, 1994. v. 56. 411 p.

HAWKINS, E.; SUTTON, R.. The potential to narrow uncertainty in regional climate predictions. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 90, n. 8, p. 1095–1107, 2009.

HAWKINS, E.; SUTTON, R.. The potential to narrow uncertainty in projections of regional precipitation change. **Climate Dynamics**, v. 37, n. 1, p. 407–418, 2011.

HAZELEGER, W.; WANG, X.; SEVERIJNS, C.; ȘTEFĂNESCU, S.; BINTANJA, R.; STERL, A.; WYSER, K.; SEMMLER, T.; YANG, S.; VAN DEN HURK, B.; VAN NOIJE, T.; VAN DER LINDEN, E.; VAN DER WIEL, K.. EC-Earth V2.2: Description and validation of a new seamless earth system prediction model. **Climate Dynamics**, v. 39, n. 11, p. 2611–2629, 2012.

HEO, K-Y.; HA,K-J.; YUN,K-S.; LEE, S-S.; KIM, H-J.; WANG, B. Methods for uncertainty assessment of climate models and model predictions over East Asia. **Int. J. Climatol.**, v. 34, p. 377–390, 2014.

HERSBACH, H.; DEE, D. ERA5 reanalysis is in production. **ECMWF Newsletter**, v. 147, p. 7, 2016. Disponível em: < <https://www.ecmwf.int/en/newsletter/147/news/era5-reanalysis-production>>. Acesso em: 2 ago. 2019.

HERSBACH, H.; BELL, B.; BERRISFORD, P.; HIRAHARA, S.; HORÁNYI, A.; MUÑOZ-SABATER, J.; NICOLAS, J.; PEUBEY, C.; RADU, R.; SCHEPERS, D.; SIMMONS, A.; SOCI, C.; ABDALLA, S.; ABELLAN, X.; BALSAMO, G.; BECHTOLD, P.; BIAVATI, G.; BIDLOT, J.; BONAVITA, J.; DE CHIARA, G.; DAHLGREN, P.; DEE, D.; DIAMANTAKIS, M.; DRAGANI, R.; FLEMMING, J.; FORBES, R.; FUENTES, M.; GEER, A.; HAIMBERGER, L.; HEALY, S.; HOGAN, R. J.; HÓLM, E.; JANISKOVA, M.; KEELEY, S.; LALOYLAUX, P.; LOPEZ, P.; LUPU, C.; RADNOTI, G.; ROSNAY, P.; ROZUM, I.; VAMBORG, F.; VILLAUME, S.; THÉPAUT, J-N.; The ERA5 global reanalysis. *Q J R Meteorol Soc.*, v. 146, p. 1999–2049, 2020.

HEWITT, H. T.; COPSEY, D.; CULVERWELL, I. D.; HARRIS, C. M.; HILL, R. S. R.; KEEN, A. B.; MCLAREN, A. J.; HUNKE, E. C. Design and implementation of the infrastructure of HadGEM3: the next-generation Met Office climate modelling system. **Geosci. Model Dev.**, v. 4, p. 223-253, 2011.

HOFFMANN, L.; GÜNTHER, G.; LI, D.; STEIN, O.; WU, X.; GRIESSBACH, S.; HENG, Y.; KONOPKA, P.; MÜLLER, R.; VOGEL, B.; WRIGHT, J. S.. From ERA-Interim to ERA5: The considerable impact of ECMWF's next-generation reanalysis on Lagrangian transport simulations. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 19, n. 5, p. 3097–3214, 2019.

IIZUMI T., TAKIKAWA, H.; HIRABAYASHI, Y.; HANASAKI, N.; NISHIMORI, M. Contributions of different bias-correction methods and reference meteorological forcing data sets to uncertainty in projected temperature and precipitation extremes. **J. Geophys. Res. Atmos.**, v. 122, p. 7800–7819, 2017.

INTERGOVERNMENTAL PANEL IN CLIMATE CHANGE – IPCC. **Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation**. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [FIELD, C. B.; BARROS, V. R.; STOCKER, T. F.; QIN, D.; DOKKEN, D. J.; EBI, K. L.; MASTRANDREA, M. D.; MACH, K. J.; PLATTNER, G. –K.; ALLEN, S. K.; TIGNOR, M.; MIDGLEY, P. M. (Ed.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2012. 582 p.

INTERGOVERNMENTAL PANEL IN CLIMATE CHANGE – IPCC. **Climate Change 2013: The Physical Science Basis**. Summary for Policymakers. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [STOCKER, T.F.; QIN, D.; PLATTNER, G. –K.; TIGNOR, M.; ALLEN, S. K.; BOSCHUNG, J.; NAUELS, A.; XIA, Y.; BEX, V.; MIDGLEY, P. M. (Ed.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013. 28 p.

INTERGOVERNMENTAL PANEL IN CLIMATE CHANGE - IPCC. **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability**. Summary for Policymakers. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the

Intergovernmental Panel on Climate Change [FIELD, C. B.; BARROS, V. R.; DOKKEN, D. J.; MACH, K. J.; MASTRANDREA, M. D.; BILIR, T. E.; CHATTERJEE, M.; EBI, K. L.; ESTRADA, Y. O.; GENOVA, R. C.; GIRMA, B.; KISSEL, E. S.; LEVY, A. N.; MACCRACKEN, S.; MASTRANDREA, P. R.; WHITE, L. L. (Ed.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom e New York, NY, USA, 2014. 32 p.

INTERGOVERNMENTAL PANEL IN CLIMATE CHANGE - IPCC. **Summary for Policymakers**. In: Global Warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. [MASSON-DELMOTTE, V.; ZHAI, P.; PÖRTNER, H.-O. ; ROBERTS, D.; SKEA, J.; SHUKLA, P.R.; PIRANI, A.; MOUFOUMA-OKIA, W.; PÉAN, C.; PIDCOCK, R.; CONNORS, S.; MATTHEWS, J.B.R.; CHEN, Y.; ZHOU, X.; GOMIS, M. I.; LONNOY, E.; MAYCOCK, T.; TIGNOR, M.; WATERFIELD, T. (Eds.)]. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 2018a. 32 p.

INTERGOVERNMENTAL PANEL IN CLIMATE CHANGE - IPCC. **Impacts of 1.5°C Global Warming on Natural and Human Systems**. HOEGH-GULDBERG, O.; JACOB, D.; TAYLOR, M.; BINDI, M.; BROWN, S.; AMILLONI, I.; DIEDHIOU, A.; DJALANTE, R.; EBI, K. L.; ENGELBRECHT, F.; GUIOT, J.; HIJOKA, Y.; MEHROTRA, S.; PAYNE, A.; SENEVIRATNE, S. I.; THOMAS, A.; WARREN, R.; ZHOU, G. In: Global Warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [MASSON-DELMOTTE, V.; ZHAI, P.; PÖRTNER, H.-O. ; ROBERTS, D.; SKEA, J.; SHUKLA, P.R.; PIRANI, A.; MOUFOUMA-OKIA, W.; PÉAN, C.; PIDCOCK, R.; CONNORS, S.; MATTHEWS, J.B.R.; CHEN, Y.; ZHOU, X.; GOMIS, M. I.; LONNOY, E.; MAYCOCK, T.; TIGNOR, M.; WATERFIELD, T. (Eds.)]. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 2018b. 138 p.

INTERGOVERNMENTAL PANEL IN CLIMATE CHANGE - IPCC. **Framing and Context**. ALLEN, M.R.; DUBE, O.P. ; SOLECKI, W.; ARAGÓN-DURAND, F. ; CRAMER, W.; HUMPHREYS, S.; KAINUMA, M.; KALA, J. ; MAHOWALD, N. ; MULUGETTA, Y. ; PEREZ, R.; WAIRIU, M.; ZICKFELD, K. In: Global Warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. [MASSON-DELMOTTE, V.; ZHAI, P.; PÖRTNER, H.-O. ; ROBERTS, D.; SKEA, J.; SHUKLA, P.R.; PIRANI, A.; MOUFOUMA-OKIA, W.; PÉAN, C.; PIDCOCK, R.; CONNORS, S.; MATTHEWS, J.B.R.; CHEN, Y.; ZHOU, X.; GOMIS, M. I.; LONNOY, E.; MAYCOCK, T.; TIGNOR, M.; WATERFIELD, T. (Eds.)]. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 2018c. 46 p.

INTERGOVERNMENTAL PANEL IN CLIMATE CHANGE - IPCC. **Climate Change and Land**: An IPCC Special Report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. Desertification [AKHTAR-SCHUSTER, M.; DRIOUECH, F.;

SANKARAN, M. (Ed.)). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom e New York, NY, USA, 2019. 174 p.

INTERGOVERNMENTAL PANEL IN CLIMATE CHANGE - IPCC. **Climate Change 2021. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, In press, 2021.

INTERGOVERNMENTAL PANEL IN CLIMATE CHANGE - IPCC. **Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 2022. 3056 pp.

INTERGOVERNMENTAL PANEL IN CLIMATE CHANGE - IPCC. **Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 2023. 115 p.

JESUS, J. B.; SOUZA, B. B.; OLIVEIRA, A. M. S.; GAMA, D. C. Aridity index and climatic risk of desertification in the semi-arid state of Sergipe. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 24, p. 214-227, 2019.

JIA, L.; YANG, X.; VECCHI, G. A.; GUDGEL, R. G., DELWORTH, T. L., ROSATI, A., STERN, W. F.; WITTENBERG, A. T.; KRISHNAMURTHY, L.; ZHANG, S.; MSADEK, R.; KAPNICK, S.; UNDERWOOD, S.; ZENG, F.; ANDERSON, W. G.; BALAJI, V.; DIXON, K. Improved Seasonal Prediction of Temperature and Precipitation over Land in a High-Resolution GFDL Climate Model. **Journal of Climate**, v. 28, n. 5, p. 2044–2062, 2015.

JOETZJER, E.; DOUVILLE, H.; DELIRE, C.; CIAIS, P. Present-day and future Amazonian precipitation in global climate models: CMIP5 versus CMIP3. **Climate Dynamics**, v. 41, n. 11, p. 2921-2936, 2013.

JONES, P. W. First- and Second-Order Conservative Remapping Schemes for Grids in Spherical Coordinates. **Monthly Weather Review**, v. 127, n. 9, p. 2204--2210. 1999.

KARMALKAR, A. V.; BRADLEY, R. S.. Consequences of global warming of 1.5 °C and 2 °C for regional temperature and precipitation changes in the contiguous United States. **PLoS ONE**, v. 12, n. 1, p. 1–17, 2017.

KIKTEV, D.; SEXTON, D. M. H.; ALEXANDER, L.; FOLLAND, C. K. Comparison of modeled and observed trends in indices of daily climate extremes. **Journal of Climate**, v. 16, p. 3560–3571, 2003.

KISTLER, R.; KALNAY, E.; COLLINS, W.; SAHA, S.; WHITE, G.; WOOLLEN, J.; CHELLIAH, M.; EBISUZAKI, W.; KANAMITSU, M.; KOUSKY, V.; VAN DEN DOOL, H.; JENNE, R.; FIORINO, M. The NCEP–NCAR 50-Year Reanalysis: Monthly Means CDROM and Documentation. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 82, n. 2, p. 247-268, 2001.

KITOH, A.; KUSUNOKI, S.; NAKAEGAWA, N. D. T. Climate change projections over South America in the late 21st century with the 20 and 60 km mesh. Meteorological Research Institute Atmospheric General Circulation Model (MRIAGCM). **Journal of Geophysical Research – Atmospheres**, v. 116, 2011.

KNIGHT, J. R.; ANDREWS, M. B.; SMITH, D. M.; ARRIBAS, A.; COLMAN, A. W.; DUNSTONE, N. J.; EADE, R.; HERMANSON, L.; MACLACHLAN, C.; PETERSON, K. A.; SCAIFE, A. A.; WILLIAMS, A. Predictions of climate several years ahead using an improved decadal prediction system, **Journal of Climate**, v. 27, p. 7550–7567, 2014.

KNUTTI, R. Should we believe model predictions of future climate change?. **Philosophical Transactions of the Royal Society A**, v. 366, p. 4647-4664, 2008.

KNUTTI, R.; FURRER, R.; TEBALDI, C.; CERMAK, J.; MEEHL, G. A.. Challenges in combining projections from multiple climate models. **Journal of Climate**, v. 23, n. 10, p. 2739–2758, 2010.

KOSTER, R. D.; MCCARTY, W.; COY, L.; GELARO, R.; HUANG, A.; MERKOVA, D.; SMITH, E. B.; SIENKIEWICZ, M.; WARGAN, K. MERRA-2 input observations: summary and assessment. Greenbelt, Maryland, USA: NASA, Technical report on global modeling and data assimilation, 46. Disponível em: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20160014544>. 29, 40. 2016.

KOUTROULIS, A. G.; PAPADIMITRIOU, L. V.; GRILLAKIS, M. G.; TSANIS, I. K.; WYSER, K.; BETTS, R. A.. Freshwater vulnerability under high end climate change. A pan-European assessment. **Science of the Total Environment**, v. 613–614, p. 271–286, 2018.

LENTON, T. M.; HELD, H.; KRIEGLER, E.; HALL, J. W.; LUCHT, W.; RAHMSTORF, S.; SCHELLNHUBER, E. H. J.. Tipping elements in the Earth's climate system. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 105, n. 6, p. 1786–1793, 2008.

LOVEJOY, T. E.; NOBRE, C.. Amazon tipping point. **Science Advances**, v. 4, n. 2, p. 1–2, 2018.

MACLACHLAN, C.; ARRIBAS, A.; PETERSON, K. A.; MAIDENS, A.; FEREDAY, D.; SCAIFE, A. A.; GORDON, M.; VELLINGA, M.; WILLIAMS, A.; COMER, R. E.; CAMP, J.; XAVIER, P.; MADEC, G. Global Seasonal forecast system version 5 (GloSea5): A high-resolution seasonal forecast system, **Q. J. R. Meteorol. Soc.**, v. 141, p. 1072–1084, 2014.

MANTUA, N. J.; HARE, S. R.; ZHANG, Y.; WALLACE, J. M.; FRANCIS, R. C. A Pacific Interdecadal Climate Oscillation with impacts on salmon production. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 78, n. 6, p. 1069-1079, 1997.

MARENGO, J.A.; BERNASCONI, M.. Regional differences in aridity/drought conditions over Northeast Brazil: present state and future projections. **Climatic Change**, v. 129, n. 1–2, p. 103–115, 2015.

MARENGO, J. A.; CAMARINHA, P. I.; ALVES, L. M.; DINIZ, F.; BETTS, R. A.; Extreme Rainfall and Hydro-Geo-Meteorological Disaster Risk in 1.5, 2.0, and 4.0°C Global Warming Scenarios: An Analysis for Brazil. **Front. Clim.** , v. 3, p. 1-17, 2021.

MARENGO, J. A.; CUNHA, A. P.; SOARES, W. R.; TORRES, R. R.; ALVES, L. M.; BRITO, S. S. B.; CUARTAS, L. A.; LEAL, K.; RIBEIRO NETO, G.; ALVALÁ, R. C. S.; MAGALHÃES, A. R. Increase Risk of Drought in the Semiarid Lands of Northeast Brazil Due to Regional Warming above 4 °C. In: NOBRE, C. A. et al. (Eds.). **Climate Change Risks in Brazil**. São Paulo: CEMADEN, 2019. p. 181-200.

MARENGO, J. A.; CUNHA, A. P.; NOBRE, C. A.; NETO, G. G. R.; MAGALHÃES, A. R.; TORRES, R. R.; SAMPAIO, G.; ALEXANDRE, F.; ALVES, L. M.; CUARTAS, L. A.; DEUSDARÁ, K. R. L.; ÁLVALA, R. C. S. Assessing drought in the drylands of northeast Brazil under regional warming exceeding 4 °C. **Natural Hazards**, v. 103, p. 2589--2611, 2020.

MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A.; SAMPAIO, G.; SALAZAR, L. F.; BORMA, L. S. Climate change in the Amazon Basin: Tipping points, changes in extremes, and impacts on natural and human systems. In: BUSH, M.; FLENLEY, J.; GOSLING, W. (Eds). **Tropical Rainforest Responses to Climatic Change**. London, New York : Springer, 2011. p. 259-283. cap. 9.

MARENGO, J. A.; RUSTICUCCI, M.; PENALBA, O.; RENOM, E M.. An intercomparison of observed and simulated extreme rainfall and temperature events during the last half of the twentieth century: Part 2: Historical trends. **Climatic Change**, v. 98, n. 3, p. 509–529, 2010.

MARENGO, J. A.; TORRES, R. R.; ALVES, L. M.. Drought in Northeast Brazil—past, present, and future. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 129, n. 3–4, p. 1189–1200, 2016.

MARENGO, J.A.; JONES, R.; ALVES, L. M.; VALVERDE, M. C. Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modeling system. **International Journal of Climatology**, v. 29, n. 15, p. 2241-2255, 2009.

MARENGO, J. A.; LIEBMANN, B.; GRIMM, A. M.; MISRA, V.; SILVA DIAS, P. L.; CAVALCANTI, I. F. A.; CARVALHO, L. M. V.; BERBERY, E. H.; AMBRIZZI, T.; VERA, C. S.; SAULO, A. C.; NOGUES-PAEGLE, J.; ZIPSER, E.; SETH, A.; ALVES, L. M. Recent developments on the South American monsoon system. **International Journal of Climatology**, v. 131, p. n/a-n/a, 2012.

MEARNS, L. O.; HULME, M.; CARTER, T. R.; LEEMANS, R., LAL, M.; WHETTON, P. H. Climate Scenario Development. In: HOUGHTON, J. T.; DING, Y.; GRIGGS, D. J.; NOGUER, M., VAN DER LINDEN, P. J.; XIAOXU, D. (Ed.).

Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge: Cambridge University Press, 2001. cap. 13

MEEHL, G. A.; STOCKER, T. F.; COLLINS, W. D.; FRIESLINGSTEIN, P.; GAYE, A. T.; GREGORY, J. M.; KITO, A.; KNUTTI, R.; MURPHY, J. M.; NODA, A.; RAPER, S. C. B.; WATTERSON, I. G.; WEAVER, A. J.; ZHAO, Z-C. Global Climate Projections. In: SOLOMON, S.; QIN, D.; MAMMING, M.; CHEN, Z.; MARQUIS, M.; AVERYT, K. B.; TIGNOR, M.; MILLER, H. L. (Ed.), **Climate Change 2007: The Physical Science Basis.** Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2007.

MOHAMMED, K.; ISLAM, A. K. M. S.; ISLAM, G. M. T.; ALFIERI, L.; KHAN, M.D. J. U.; BALA, S. K.; DAS, E. M. K.. Future Floods in Bangladesh under 1.5 °C, 2 °C, and 4 °C Global Warming Scenarios. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 23, n. 12, p. 04018050, 2018.

MORCRETTE, J.-J.; BARKER, H.; COLE, J.; IACONO, M.; PINCUS, R. Impact of a new radiation package, mcrad, in the ECMWF integrated forecasting system. **Mon. Wea. Rev.**, v. 136, p. 4773-4798, 2008.

MOSS, R. H.; EDMONDS, J. A.; HIBBARD, K. A.; MANNING, M. R.; ROSE, S. K.; VAN VUUREN, D. P.; CARTER, T. R.; EMORI, S.; KAINUMA, M.; KRAM, T.; MEEHL, G. A.; MITCHELL, J. F. B.; NAKICENOVIC, N.; RIAHI, K.; SMITH, S. J.; STOUFFER, R. J.; THOMSON, A. M.; WEYANT, J. P.; WILBANKS, E. T. J.. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. **Nature**, v. 463, n. 7282, p. 747–756, 2010.

NATIVIDADE, U. A.; GARCIA, S. R.; TORRES, R. R. Tendência dos índices de extremos climáticos observados e projetados no estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 4, p. 600–614, 2017.

NAUMANN, G.; ALFIERI, L.; WYSER, K.; MENTASCHI, L.; BETTS, R. A.; CARRAO, H.; SPINONI, J.; VOGT, J.; FEYEN, L.. Global Changes in Drought Conditions Under Different Levels of Warming. p. 3285–3296, 2018.

NOBRE, C. A.; BORMA, L. S.. “Tipping points” for the Amazon forest. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 1, n. 1, p. 28–36, 2009.

NOBRE, C. A.; SAMPAIO, G.; BORMA, L. S.; CASTILLA-RUBIO, J. C.; SILVA, J. S.; CARDOSO, E. M.. Land-use and climate change risks in the Amazon and the need of a novel sustainable development paradigm. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 113, n. 39, p. 10759–10768, 2016.

O’NEILL, B. C.; TEBALDI, C.; VAN VUUREN, D. P.; EYRING, V.; FRIEDLINGSTEIN, P.; HURTT, G.; KNUTTI, R.; KRIEGLER, E.; LAMARQUE, J. F.; LOWE, J.; MEEHL, G. A.; MOSS, R.; RIAHI, K.; SANDERSON, E B. M.. The

Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. **Geoscientific Model Development**, v. 9, n. 9, p. 3461–3482, 2016.

OYAMA, M. D.; NOBRE, C. A.. A new climate-vegetation equilibrium state for Tropical South America. **Geophysical Research Letters**, v. 30, n. 23, p. 10–13, 2003.

PILOTTO, I. L.; RODRIGUEZ, D. A.; CHOU, S. C.; GAROFOLO, L.; GOMES, J. L. Impacts of the land use and land-cover changes on local hydroclimate in southwestern Amazon. **Clim Dyn**, v. 61, p. 5597–5612, 2023.

QUADRO, M. F. L., 1994: Estudo de episódios de zonas de convergência do Atlântico Sul (ZCAS) sobre a América do Sul. Dissertação de Mestrado, INPE, São José dos Campos (SP), 97 pp.

REBOITA, M. S.; AMBRIZZI, T.; DA ROCHA, R. P.; Relationship between the Southern Annular Mode and Southern Hemisphere Atmospheric Systems. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, n. 1, p. 48–55, 2009.

REGOTO, P.; DEREZYNSKI, C.; CHOU, S. C.; BAZZANELA, A. C. Observed changes in air temperature and precipitation extremes over Brazil. **International Journal of Climatology**, p. 1–18, 2021.

REICHLER, R. H.; LIU, Q. Observation-corrected precipitation estimates in GEOS-5. Greenbelt, Maryland, USA: NASA, Technical report series on global modeling and data assimilation, 35. 30. 2014.

RIAHI, K.; RAO, S.; KREY, V.; CHO, C.; CHIRKOV, V.; FISCHER, G.; KINDERMANN, G.; NAKICENOVIC, N.; RAFAJ, E. P.. RCP 8.5-A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. **Climatic Change**, v. 109, n. 1, p. 33–57, 2011.

RIAHI, K.; VAN VUUREN, D. P.; KRIEGLER, E.; EDMONDS, J.; O'NEILL, B. C.; FUJIMORI, S.; BAUER, N.; CALVIN, K.; DELLINK, R.; FRICKO, O.; LUTZ, W.; POPP, A.; CUARESMA, J. C.; KC, S.; LEIMBACH, M.; JIANG, L.; KRAM, T.; RAO, S.; EMMERLING, J.; EBI, K.; HASEGAWA, T.; HAVLIK, P.; HUMPENÖDER, F.; DA SILVA, L. A.; SMITH, S.; STEHFEST, E.; BOSETTI, V.; EOM, J.; GERNAAT, D.; MASUI, T.; ROGELJ, J.; STREFLER, J.; DROUET, L.; KREY, V.; LUDERER, G.; HARMSSEN, M.; TAKAHASHI, K.; BAUMSTARK, L.; DOELMAN, J. C.; KAINUMA, M.; KLIMONT, Z.; MARANGONI, G.; LOTZE-CAMPEN, H.; OBERSTEINER, M.; TABEAU, A.; TAVONI, E. M.. The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. **Global Environmental Change**, v. 42, p. 153–168, 2016.

RODRIGUES, R. R.; MCPHADEN, M. J.. Why did the 2011–2012 La Niña cause a severe drought in the Brazilian Northeast? **Geophysical Research Letters** Research, n. April, p. 6413–6419, 2014.

ROGELJ, J.; SCHAEFFER, M.; FRIEDLINGSTEIN, P.; GILLETT, N. P.; VAN VUUREN, D. P.; RIAHI, K.; ALLEN, M.; KNUTTI, E. R.. Differences between

- carbon budget estimates unravelled. **Nature Climate Change**, v. 6, n. 3, p. 245–252, 2016.
- SALATI, E.; DALL'OLLIO, A.; MATSUI, E.; GAT, J. R. Recycling of Water in the Amazon, Brazil: an isotopic study. **Water Resour. Res.**, v. 15, p. 1250–1258, 1979.
- SAMPAIO, G.; NOBRE, C.; COSTA, M. H.; SATYAMURTY, P.; SOARES-FILHO, B. S.; CARDOSO, E. M.. Regional climate change over eastern Amazonia caused by pasture and soybean cropland expansion. **Geophysical Research Letters**, v. 34, n. 17, 2007.
- SANTOS, E.; MATOS, H.; ALVARENGA, J.; SALES, M. C. L.. A seca no Nordeste no Ano de 2012: relato sobre a estiagem na região e o exemplo de prática de convivência com o semiárido no distrito de Iguaçu/Canindé-Ce. **Revista Geonorte**, v. 1, n. 5, p. 819–830, 2012.
- SANTOS, T. S.; MENDES, D.; CASTRO, A. A.; SILVA, E. A. R.. Incertezas Das Projeções De Mudanças Climáticas: Análise Preliminar. **Ciência e Natura**, v. 37, n. 0, p. 63–68, 2015.
- SATYAMURTY P.; MATTOS L. F.; Climatological lower tropospheric frontogenesis in the midlatitudes due to horizontal deformation and divergence. **Monthly Weather Review**. v. 117, n. 6, p. 1355-1364, 1989.
- SEDDON, A. W. R.; MACIAS-FAURIA, M.; LONG, P. R.; BENZ, D.; WILLIS, K. J.. Sensitivity of global terrestrial ecosystems to climate variability. **Nature**, v. 531, n. 7593, p. 229–232, 2016.
- SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL - SGB. 49º Boletim de Alerta Hidrológico da Bacia do Amazonas. Ed.: MACIEL, J. S. C.; SANTOS, A. L. M. R.; SANTOS, M. S.; MATOS, A. J. S.; CORRÊA, B. G. S.; LOUREIRO, L. Sistema de Alerta Hidrológico da bacia do Amazonas, Manaus, set. 2023. Disponível em: https://www.sgb.gov.br/sace/boletins/Amazonas/20231110_14-20231110%20-%20144716.pdf. Acesso em: 15 de novembro de 2023.
- SILLMANN, J.; KHARIN, V. V.; ZHANG, X.; ZWIERS, F. W.; BRONAUGH, D. Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 1. Model evaluation in the present climate. **Journal of Geophysical Research**, v. 118, p. 1-18, 2013a.
- SILLMANN, J.; KHARIN, V. V.; ZWIERS, F. W.; ZHANG, X.; BRONAUGH, D.. Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 2. Future climate projections. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, v. 118, n. 6, p. 2473–2493, 2013b.
- SILVA, V. O.; DE MELLO, C. R.; CHOU, S. C. Projections of severe droughts in future climate in Southeast Brazil: a case study in Southern Minas Gerais State, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 147, p. 1-15, 2022.
- SILVA, W.L.; DEREZYNSKI, C.; CHOU, S.C.; CAVALCANTI, I. Future Changes in Temperature and Precipitation Extremes in the State of Rio de Janeiro (Brazil). **American Journal of Climate Change**, v. 3, n. 4, p. 353, 2014.

- SILVA, W.L.; DERECZYNSKI, C.; CHANG, M.; FREITAS, M.; MACHADO, B.J.; TRISTÃO, L.; RUGGERI, J. Tendências observadas em indicadores de extremos climáticos de temperatura e precipitação no estado do Paraná. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 30, n. 2, p. 181-194, 2015.
- SILVEIRA, C. S.; FILHO, F. A. S.; MARTINS, E. S. P. R.; OLIVEIRA, J. L.; COSTA, A. C.; NOBREGA, M. T.; SOUZA, S. A.; SILVA, R. F. V. Mudanças climáticas na bacia do rio São Francisco: Uma análise para precipitação e temperatura. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n. 2, p. 416-428, 2016.
- SKANSI, M. L. M.; BRUNET, M.; SIGRÓ, J.; AGUILAR, E.; GROENING, J. A. A.; BENTANCUR, O. J.; GEIER, Y. R. C.; AMAYA, R. L. C.; JÁCOME, H.; RAMOS, A. M.; ROJAS, C. O.; PASTEN, A. M.; MITRO, S. S.; JIMÉNEZ, C. V.; MARTÍNEZ, R.; ALEXANDER, L. V.; JONES, P. D.. Warming and wetting signals emerging from analysis of changes in climate extreme indices over South America. **Global and Planetary Change**, v. 100, p. 295–307, 2013.
- SOARES, W.; MARENGO, J. A. Assessments of moisture fluxes east of the Andes in South America in a global warming scenario. **International Journal of Climatology**, v. xx, p. 1-20, 2008.
- SONDERMANN, M.; CHOU, S. C.; LYRA, A.; LATINOVIC, D.; SIQUEIRA, G. C.; CRUZ JUNIOR, W.; GIORNES, E.; LEITE, F. P. Climate change projections and impacts on the eucalyptus plantation around the Doce River basin, in Minas Gerais, Brazil. **Climate Services**, v. 28, 100327, 2022.
- SOLOMON, S.; QIN, D.; MANNING, M.; CHEN, Z.; MARQUIS, M.; AVERYT, K.; TIGNOR, M. M. B.; MILLER, H. L. (Eds.). **Climate Change 2007: The Physical Science Basis**. Cambridge University Press, 2007. 996 p.
- SPIEGEL, M. R. Estatística. 3.ed. São Paulo: Makron Books, 1993. 643p. (Coleção Schaum).
- SUNYER, M. A.; MADSEN, H.; ROSBJERG, D.; ARNBJERG-NIELSE, K. A Bayesian Approach for Uncertainty Quantification of Extreme Precipitation Projections Including Climate Model Interdependency and Nonstationary Bias. **Journal of Climate**, v. 27, p. 7113-7132, 2014.
- TAVARES, P. S.; ACOSTA, R.; NOBRE, P.; RESENDE, N. C.; CHOU, S. C.; LYRA, A. A. Water balance components and climate extremes over Brazil under 1.5 °C and 2.0 °C of global warming scenarios. **Regional Environmental Change**, v. 23, n. 40, p. 1-16, 2023.
- TAYLOR, K. E. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 106, p. 7183-7192, 2001.
- TEBALDI, C.; ARBLASTER, J. M.; KNUTTI, R. Mapping model agreement on future climate projections. **Geophysical Research Letters**, v. 38, p. 1-5, 2011.

TINKER, J.; LOWE, J.; PARDAENS, A.; HOLT, J.; BARCIELA, R.. Uncertainty in climate projections for the 21st century northwest European shelf seas. **Progress in Oceanography**, v. 148, p. 56–73, 2016.

TORRES, R. R. **Análise de incertezas em projeções de mudanças climáticas na América do Sul**. 2014. 271 f. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, SP, 2014.

TRENBERTH, K. E. The Definition of El Niño. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 78, n. 12, 1997.

UNFCCC. CONFERENCE OF THE PARTIES (COP). ADOPTION OF THE PARIS AGREEMENT - Conference of the Parties COP 21. **Adoption of the Paris Agreement. Proposal by the President.**, v. 21932, n. December, p. 32, 2015.

UVO, C. B; A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e sua relação com a precipitação da Região Norte do Nordeste Brasileiro. 81p. (INPE – 4887 – TDL/378). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1989.

VALVERDE, M. C.; MARENGO, J. A.. Extreme Rainfall Indices in the Hydrographic Basins of Brazil. **Open Journal of Modern Hydrology**, v. 04, n. 01, p. 10–26, 2014.

VAN HAREN, R.; HAARSMA, R. J.; OLDENBORGH, G. J. V.; HAZELEGER, W.. Resolution dependence of European precipitation in a state-of-the-art atmospheric general circulation model. **Journal of Climate**, v. 28, n. 13, p. 5134–5149, 2015.

VAN VUUREN, D. P.; EDMONDS, J.; KAINUMA, M.; RIAHI, K.; THOMSON, A.; HIBBARD, K.; HURTT, G. C.; KRAM, T.; KREY, V.; LAMARQUE, J. F.; MASUI, T.; MEINSHAUSEN, M.; NAKICENOVIC, N.; SMITH, S. J.; ROSE, E S. K.. The representative concentration pathways: An overview. **Climatic Change**, v. 109, n. 1, p. 5–31, 2011.

VOUSDOUKAS, M. I.; VOUKOUVALAS, E.; ANNUNZIATO, A.; GIARDINO, A.; FEYEN, E L.. Projections of extreme storm surge levels along Europe. **Climate Dynamics**, v. 47, n. 9, p. 3171–3190, 2016.

WALTERS, D.; BOUTLE, I.; BROOKS, M.; MELVIN, T.; STRATTON, R.; VOSPER, S.; WELLS, H.; WILLIAMS, K.; WOOD, N.; ALLEN, T.; BUSHHELL, A.; COPSEY, D.; EARNSHAW, P.; EDWARDS, J.; GROSS, M.; HARDIMAN, S.; HARRIS, C.; HEMING, J.; KLINGAMAN, N.; LEVINE, R.; MANNERS, J.; MARTIN, G.; MILTON, S.; MITTERMAIER, M.; MORCRETTE, C.; RIDDICK, T.; ROBERTS, M.; SANCHEZ, C.; SELWOOD, P.; STIRLING, A.; SMITH, C.; SURI, D.; TENNANT, W.; LUIGI VIDALE, P.; WILKINSON, J.; WILLETT, M.; WOOLNOUGH, S.; XAVIER, P.. The Met Office Unified Model Global Atmosphere 6.0/6.1 and JULES Global Land 6.0/6.1 configurations. **Geoscientific Model Development**, v. 10, n. 4, p. 1487–1520, 2017.

WANG, C.; DESER, C.; YU, J.-Y.; DINEZIO, P.; CLEMENT, A. El Niño-Southern Oscillation (ENSO): A review. In: GLYMN, P.; MANZELLO, D.; ENOCHS, I. (Ed.). *Coral Reefs of the Eastern Pacific*. Dordrecht: **Springer Science Publisher**, 2016. cap. 4, p. 85-106.

WINTON, M.; ANDERSON, W. G.; DELWORTH, T. L.; GRIFFIES, S. M.; HURLIN, W. J.; ROSATI, A.. Has coarse ocean resolution biased simulations of transient climate sensitivity? **Geophysical Research Letters Research**, p. 8522–8529, 2014.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION – WMO. **Greenhouse Gas Bulletin. The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2015**. Atmospheric Environment Research Division, Research Department, Geneva, 8 p. 2016.

WOOD, N.; STANFORTH, A.; WHITE, A.; ALLEN, T.; DIAMANTAKIS, M.; GROSS, M.; MELVIN, T.; SMITH, C.; VOSPER, S.; ZERROUKAT, M.; THUBURN, J.. An inherently mass-conserving semi-implicit semi-Lagrangian discretization of the deep-atmosphere global non-hydrostatic equations. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 140, n. 682, p. 1505–1520, 2014.

WYSER, K.; STRANDBERG, G.; CAESAR, J.; GOHAR, L.. Documentation of changes in climate variability and extremes simulated by the HELIX AGCMs at the 3 SWLs and comparison in equivalent SST/SIC low-resolution CMIP5 projections. **Seventh Framework Programme Theme 6 Environment Project: 603864 – HELIX Full**, 2017.

ZHANG, X.; ALEXANDER, L.; HEGERL, G. C.; JONES, P.; TANK, A. K.; PETERSON, T. C.; TREWIN, B.; ZWIERS, F. W. Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. Advanced Review. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change**, p. 851-870, 2011.

ZHOU, J.; LAU, K. Does a monso on climate exist over south america? **Journal of Climate**, v. 11, n. 5, p. 1020--1040, 1998.

APÊNDICE A - SIMULAÇÕES INDIVIDUAIS DOS MODELOS DO HELIX

Figura A.1 - Climatologia média anual de CDD (esquerda) e viés associado (direita), simulada pelos MCGs do HELIX para o período 1981-2010. A climatologia observada pelo CHIRPS encontra-se no canto inferior esquerdo. As áreas hachuradas correspondem a vieses significativos estatisticamente. As unidades estão em dias.

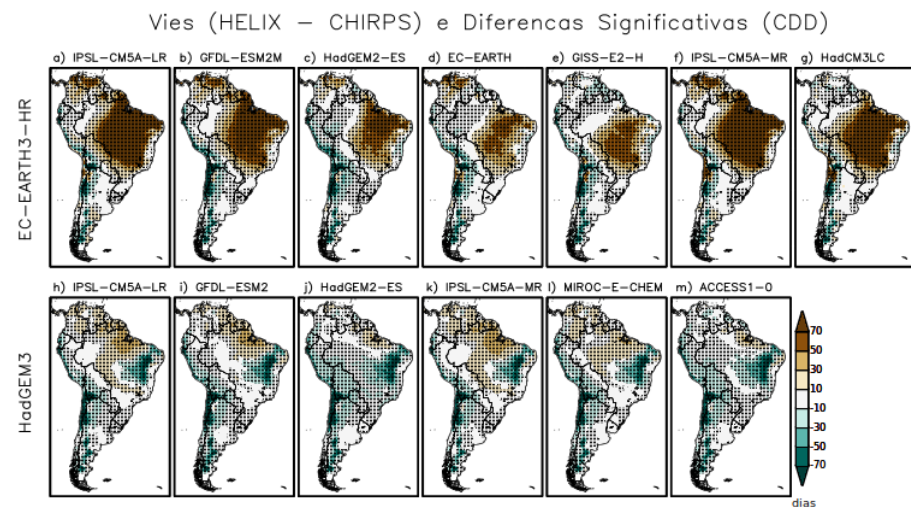
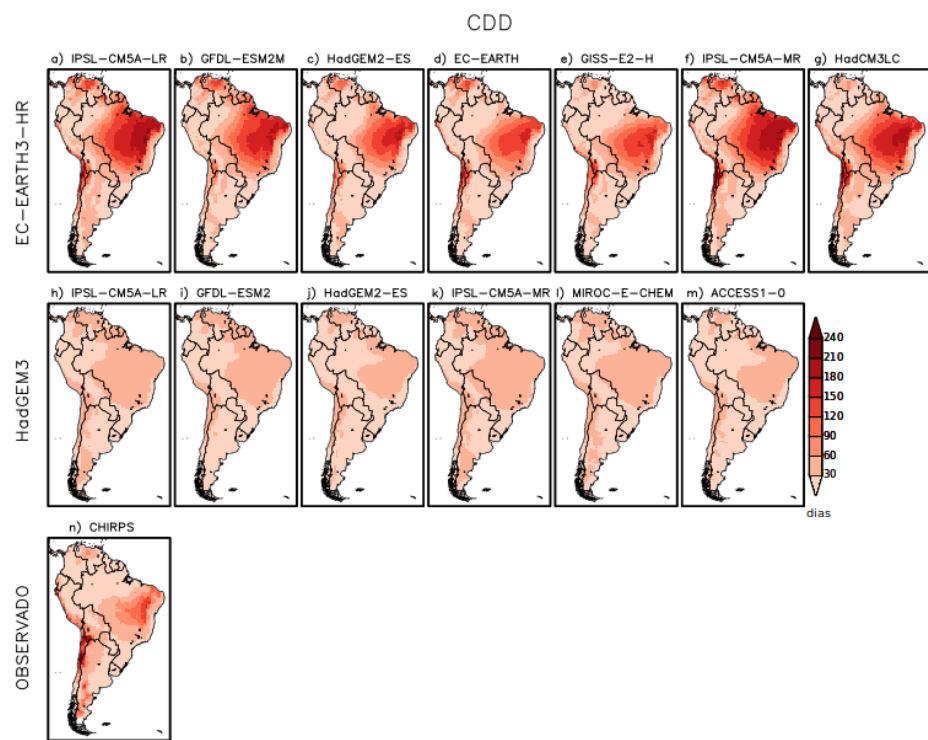
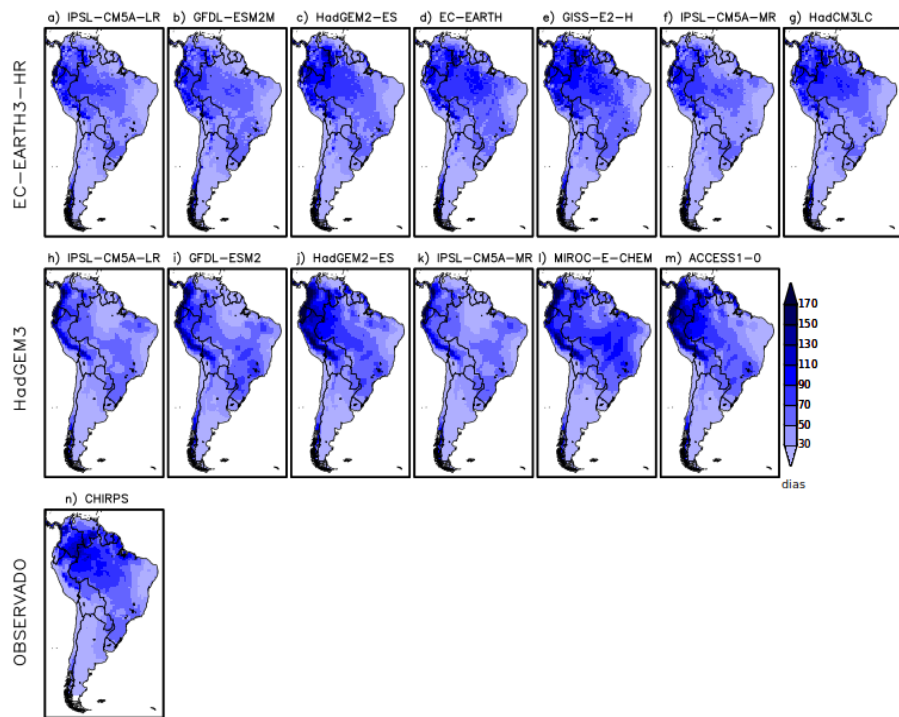


Figura A.2 - Climatologia média anual de R10mm (esquerda) e viés associado (direita), simulada pelos MCGs do HELIX para o período 1981-2010. A climatologia observada pelo CHIRPS encontra-se no canto inferior esquerdo. As áreas hachuradas correspondem a vieses significativos estatisticamente. As unidades estão em dias.

R10mm



Vies (HELIX - CHIRPS) e Diferenças Significativas (R10mm)

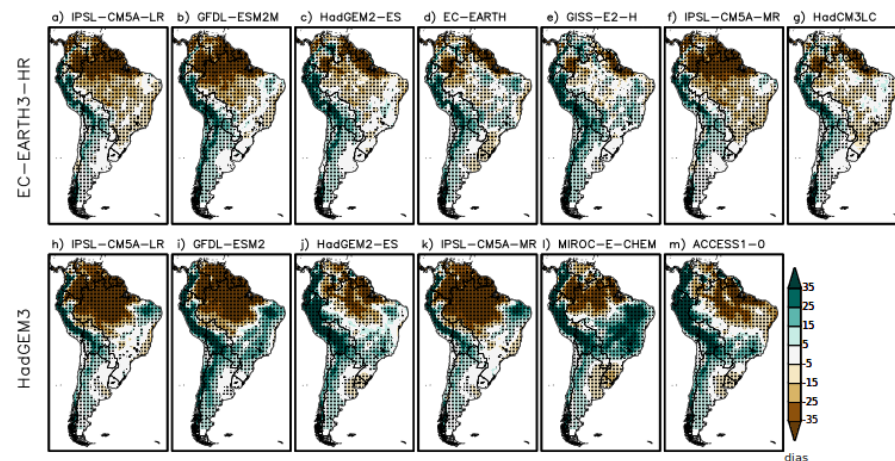


Figura A.3 - Climatologia média anual de R30mm (esquerda) e viés associado (direita), simulada pelos MCGs do HELIX para o período 1981-2010. A climatologia observada pelo CHIRPS encontra-se no canto inferior esquerdo. As áreas hachuradas correspondem a vieses significativos estatisticamente. As unidades estão em dias.

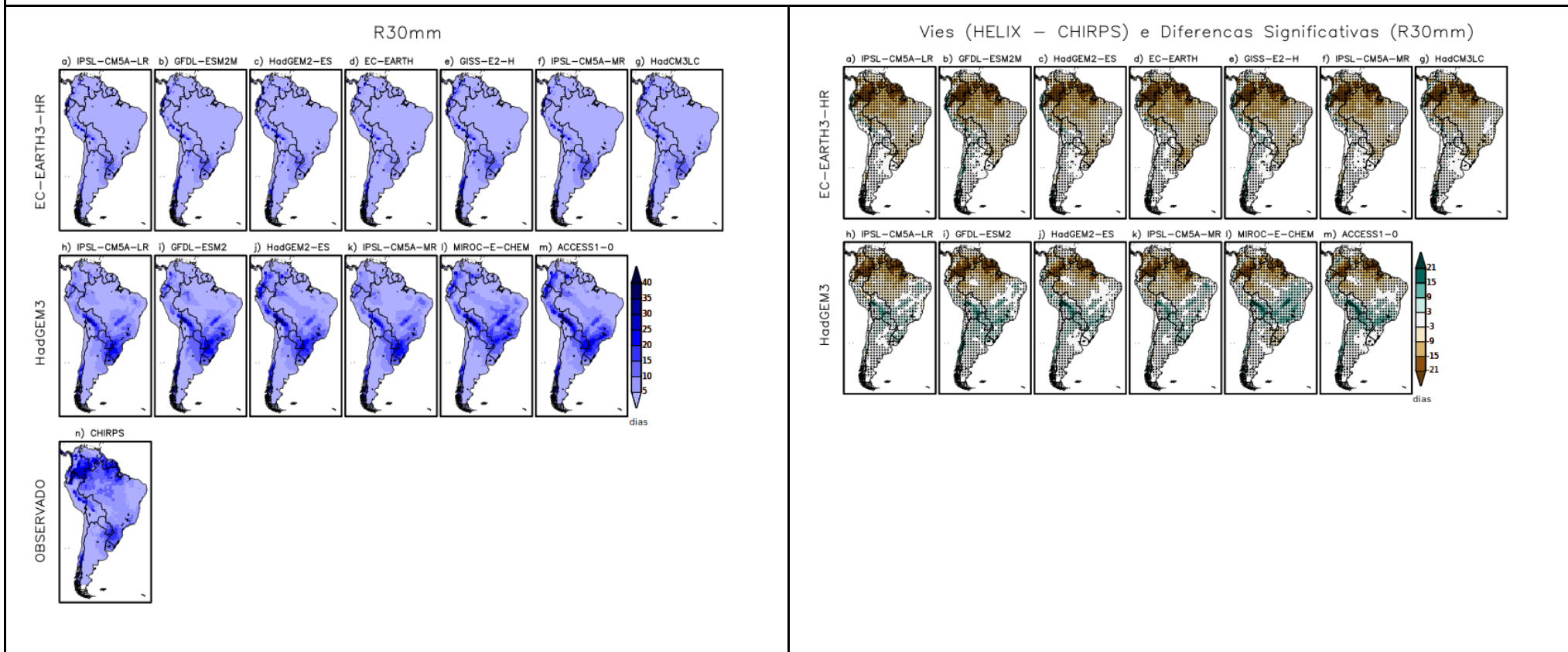


Figura A.4 - Climatologia média anual de R95p (esquerda) e viés associado (direita), simulada pelos MCGs do HELIX para o período 1981-2010. A climatologia observada pelo CHIRPS encontra-se no canto inferior esquerdo. As áreas hachuradas correspondem a vieses significativos estatisticamente. As unidades estão em mm.

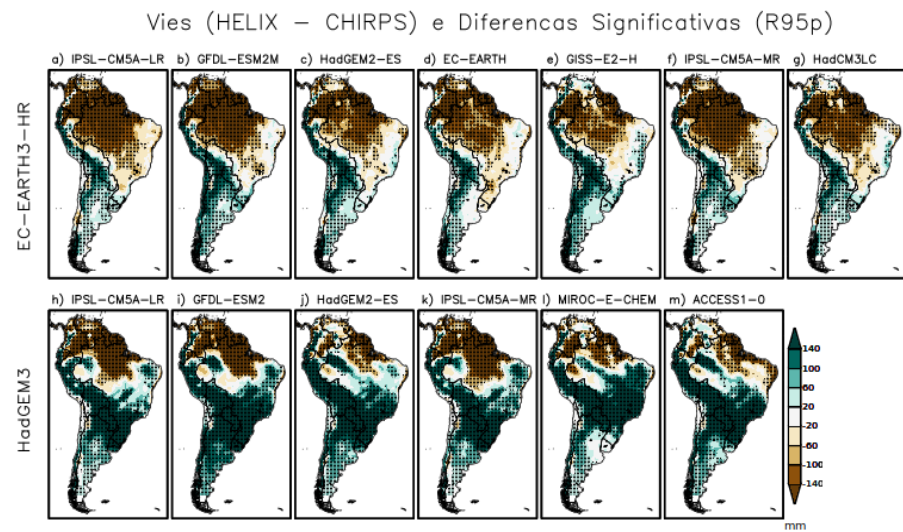
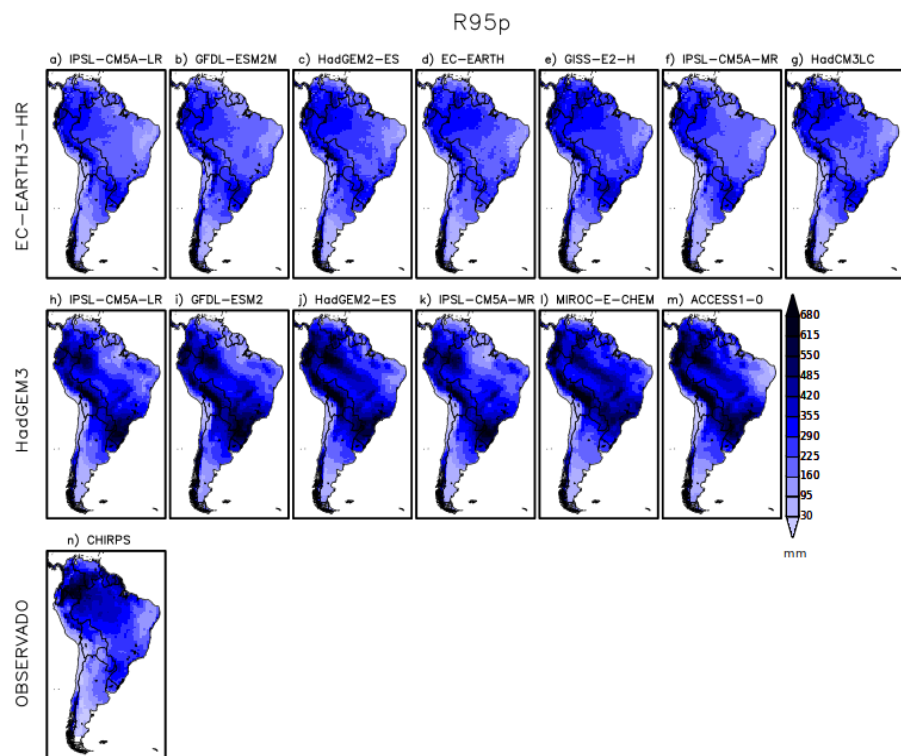


Figura A.5 - Climatologia média anual de Rx5Day (esquerda) e viés associado (direita), simulada pelos MCGs do HELIX para o período 1981-2010. A climatologia observada pelo CHIRPS encontra-se no canto inferior esquerdo. As áreas hachuradas correspondem a vieses significativos estatisticamente. As unidades estão em mm.

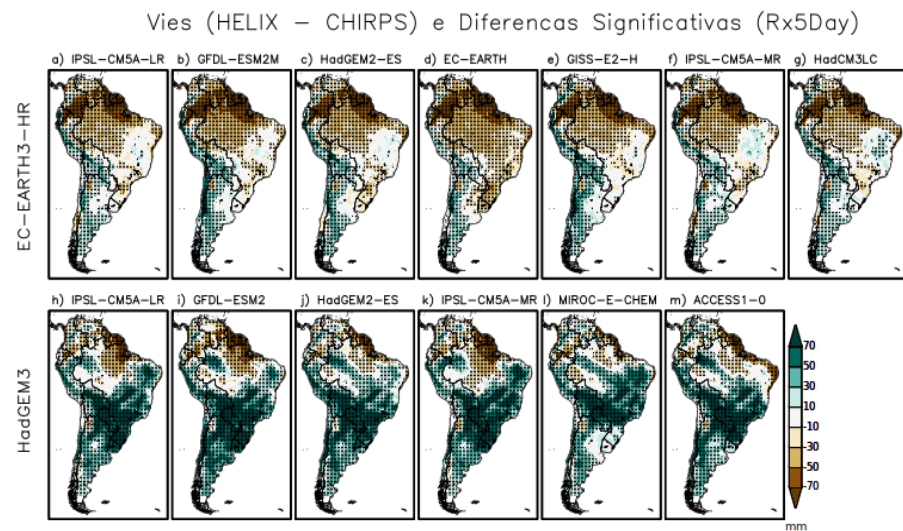
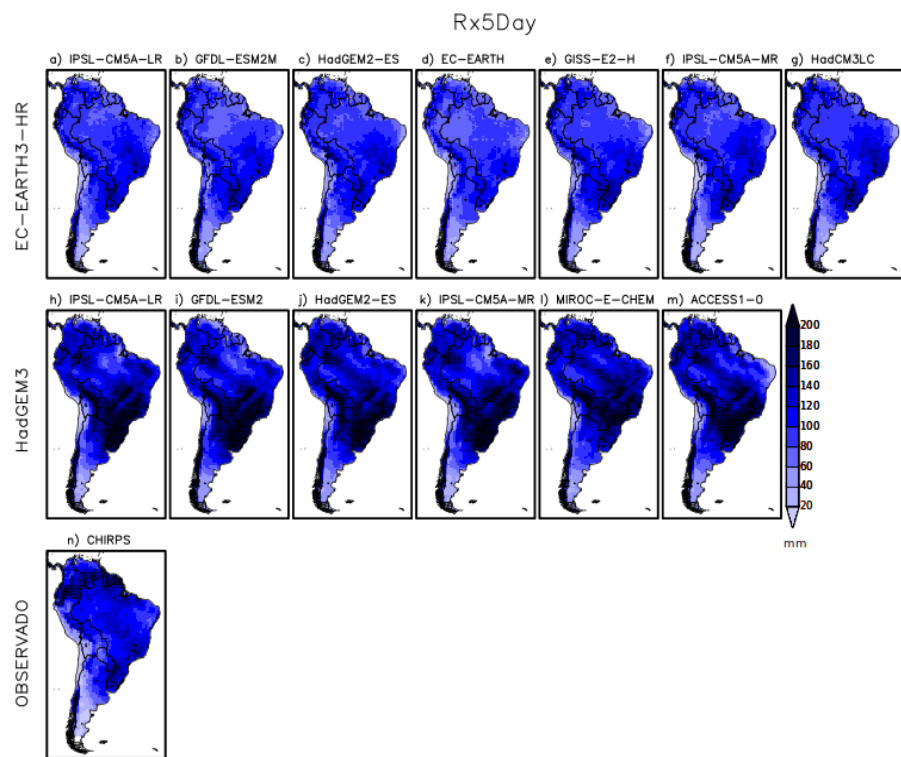


Figura A.6 - Climatologia média anual de TN10p (esquerda) e viés associado (direita), simulada pelos MCGs do HELIX para o período 1981-2010. A climatologia observada pelo ERA-5 encontra-se no canto inferior esquerdo. As áreas hachuradas correspondem a vieses significativos estatisticamente. As unidades estão em %.

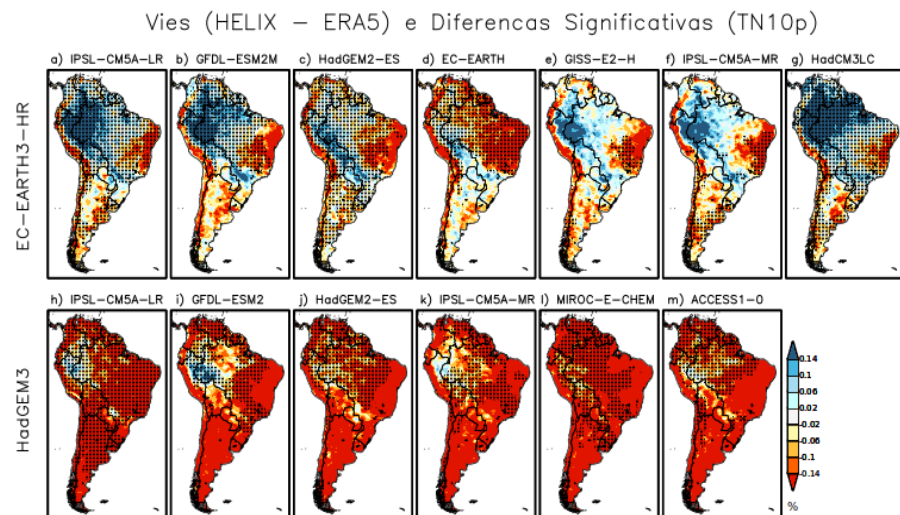
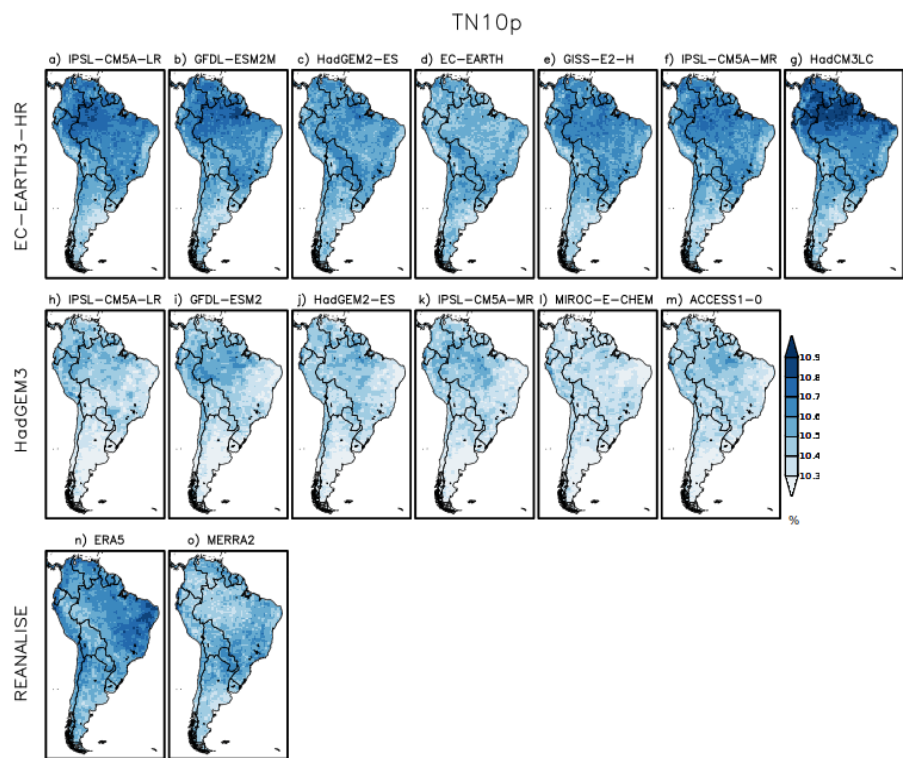


Figura A.7 - Climatologia média anual de TN10p (esquerda) e viés associado (direita), simulada pelos MCGs do HELIX para o período 1981-2010. A climatologia observada pelo MERRA-2 encontra-se no canto inferior direito. As áreas hachuradas correspondem a vieses significativos estatisticamente. As unidades estão em %.

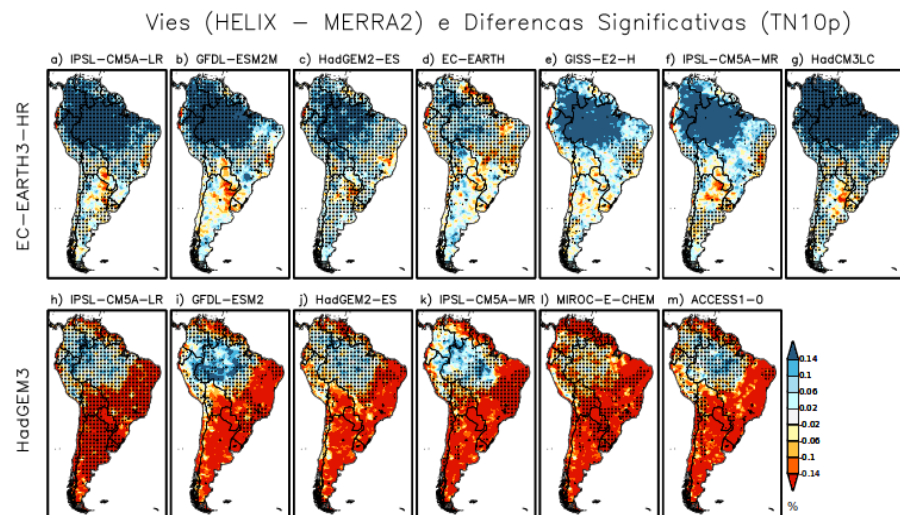
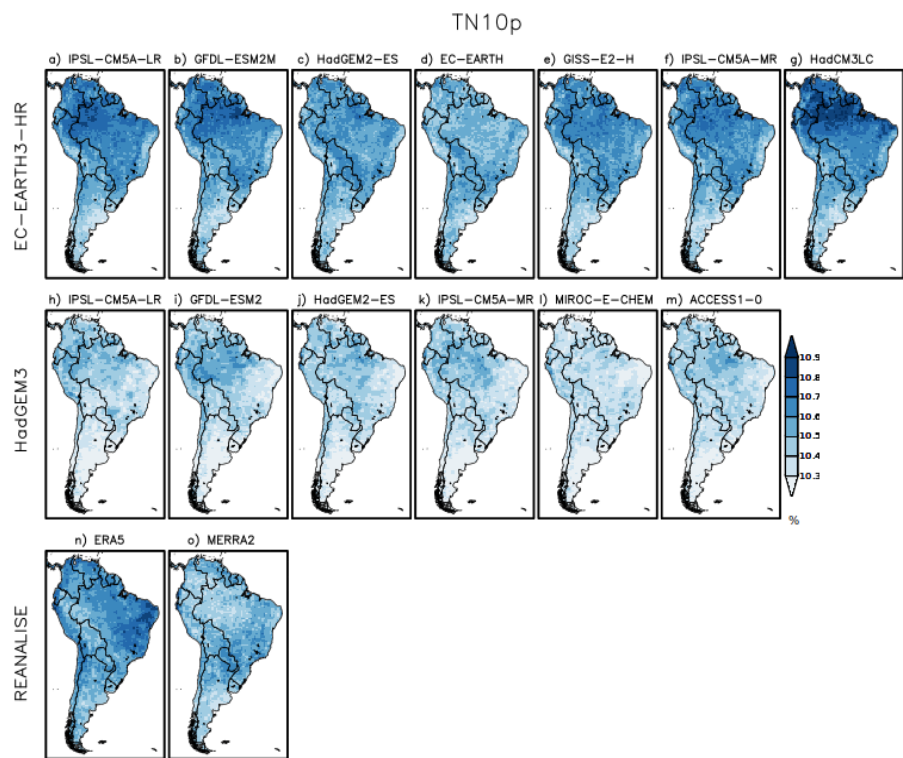


Figura A.8 - Climatologia média anual de TN90p (esquerda) e viés associado (direita), simulada pelos MCGs do HELIX para o período 1981-2010. A climatologia observada pelo ERA-5 encontra-se no canto inferior esquerdo. As áreas hachuradas correspondem a vieses significativos estatisticamente. As unidades estão em %.

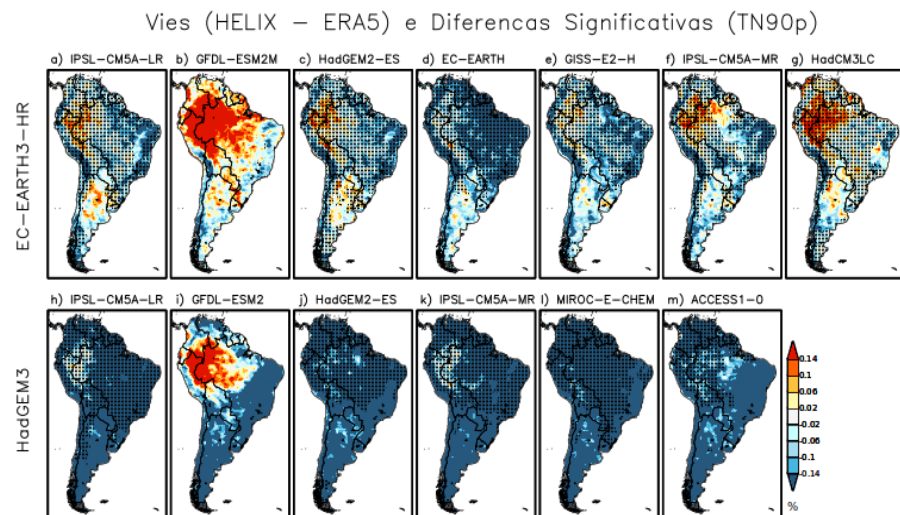
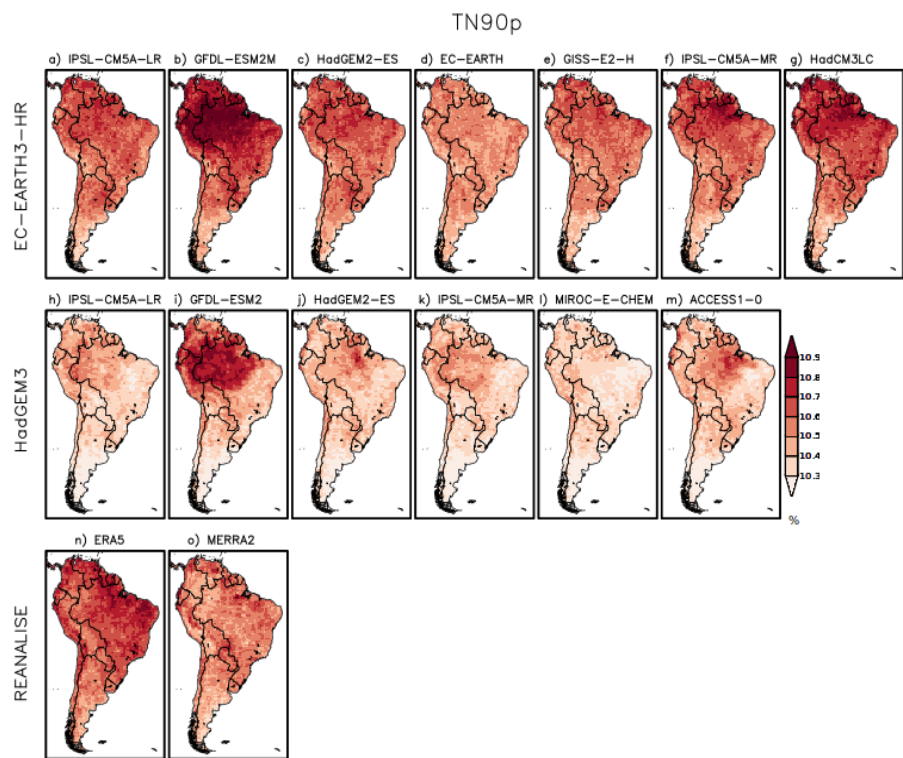


Figura A.9 - Climatologia média anual de TN90p (esquerda) e viés associado (direita), simulada pelos MCGs do HELIX para o período 1981-2010. A climatologia observada pelo MERRA-2 encontra-se no canto inferior direito. As áreas hachuradas correspondem a vieses significativos estatisticamente. As unidades estão em %.

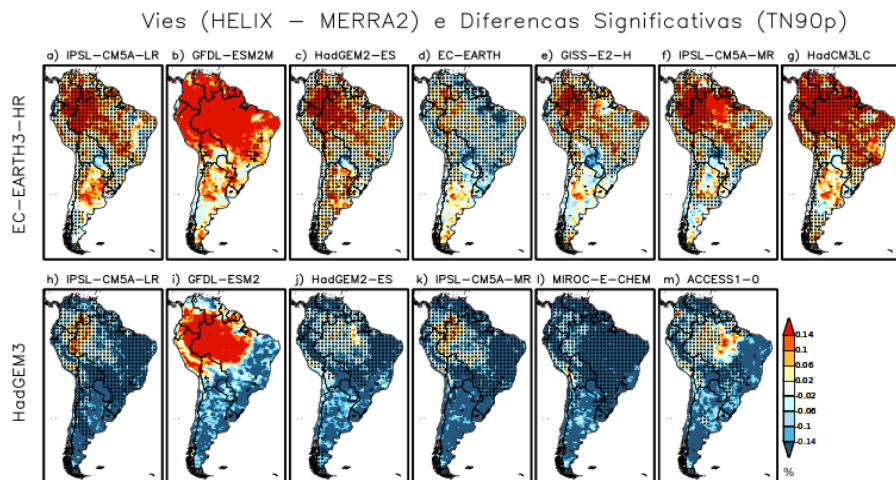
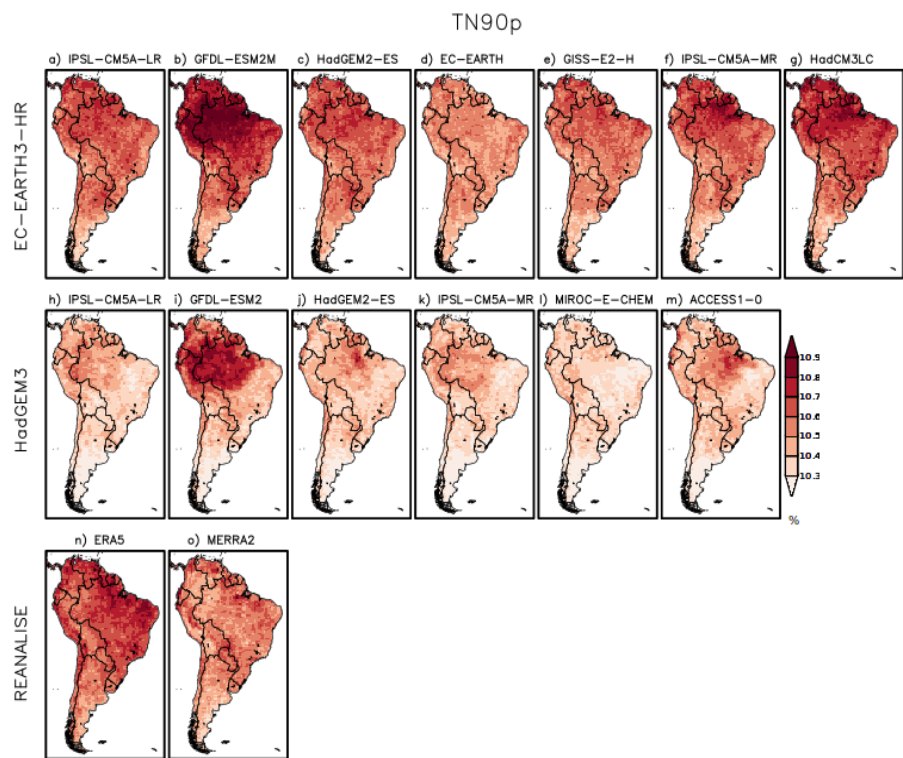


Figura A.10 - Climatologia média anual de TX10p (esquerda) e viés associado (direita), simulada pelos MCGs do HELIX para o período 1981-2010. A climatologia observada pelo ERA-5 encontra-se no canto inferior esquerdo. As áreas hachuradas correspondem a vieses significativos estatisticamente. As unidades estão em %.

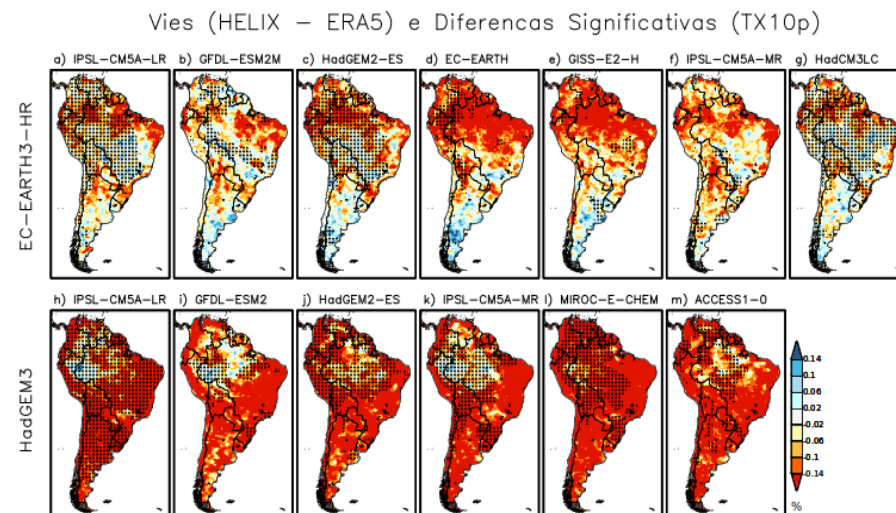
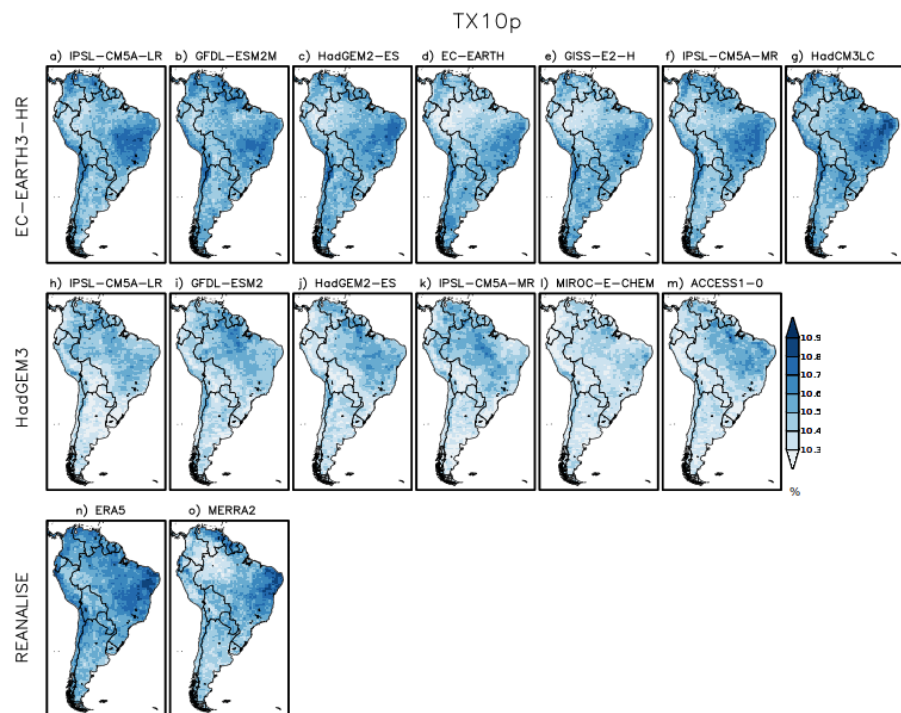


Figura A.11 - Climatologia média anual de TX10p (esquerda) e viés associado (direita), simulada pelos MCGs do HELIX para o período 1981-2010. A climatologia observada pelo MERRA-2 encontra-se no canto inferior direito. As áreas hachuradas correspondem a vieses significativos estatisticamente. As unidades estão em %.

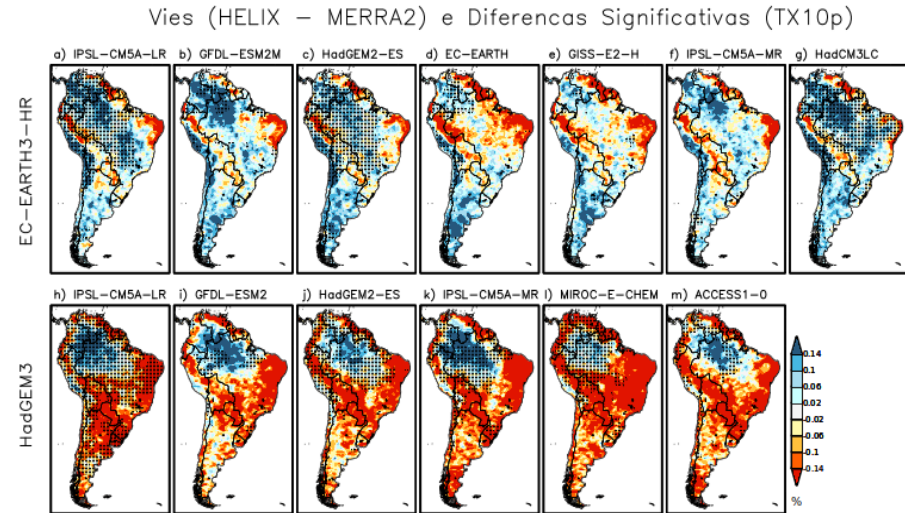
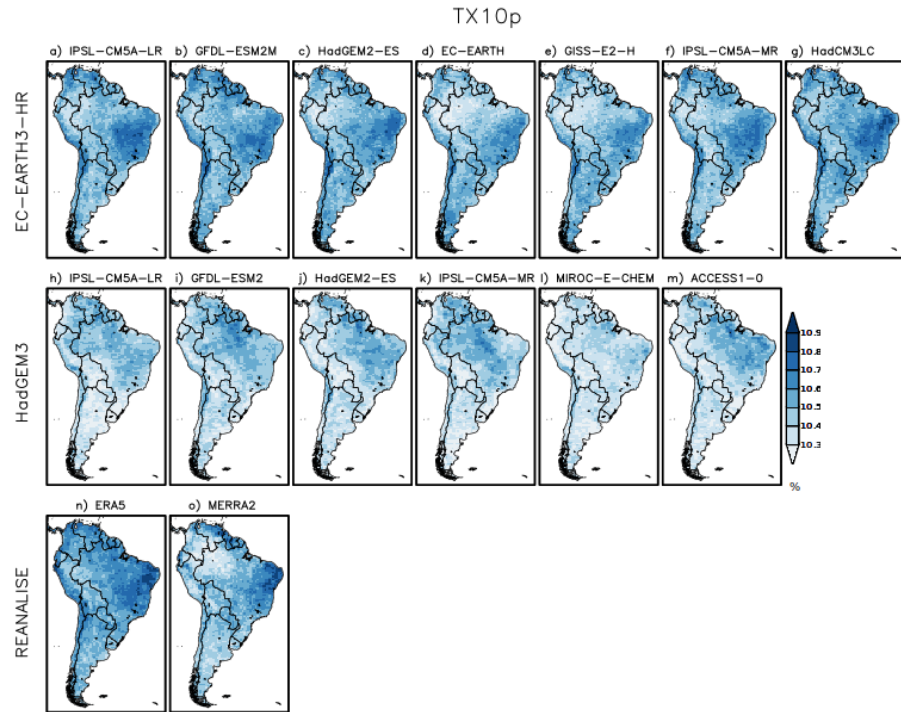


Figura A.12 - Climatologia média anual de TX90p (esquerda) e viés associado (direita), simulada pelos MCGs do HELIX para o período 1981-2010. A climatologia observada pelo ERA-5 encontra-se no canto inferior esquerdo. As áreas hachuradas correspondem a vieses significativos estatisticamente. As unidades estão em %.

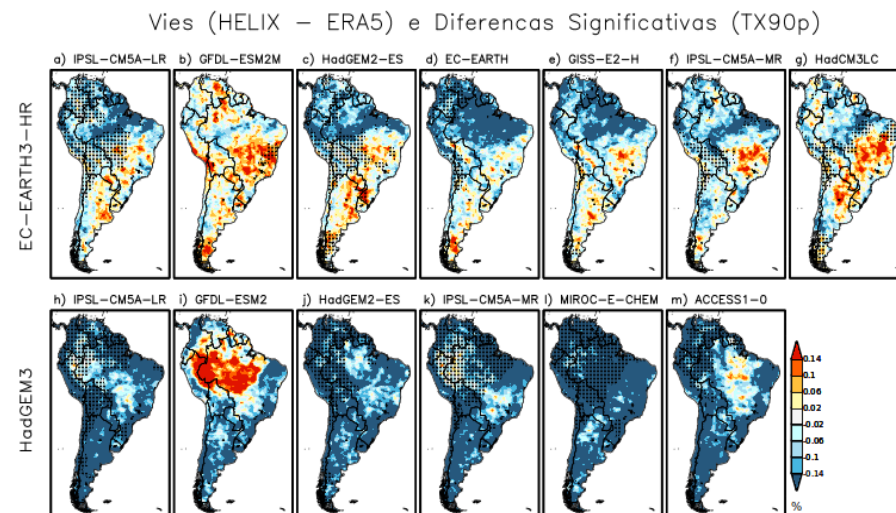
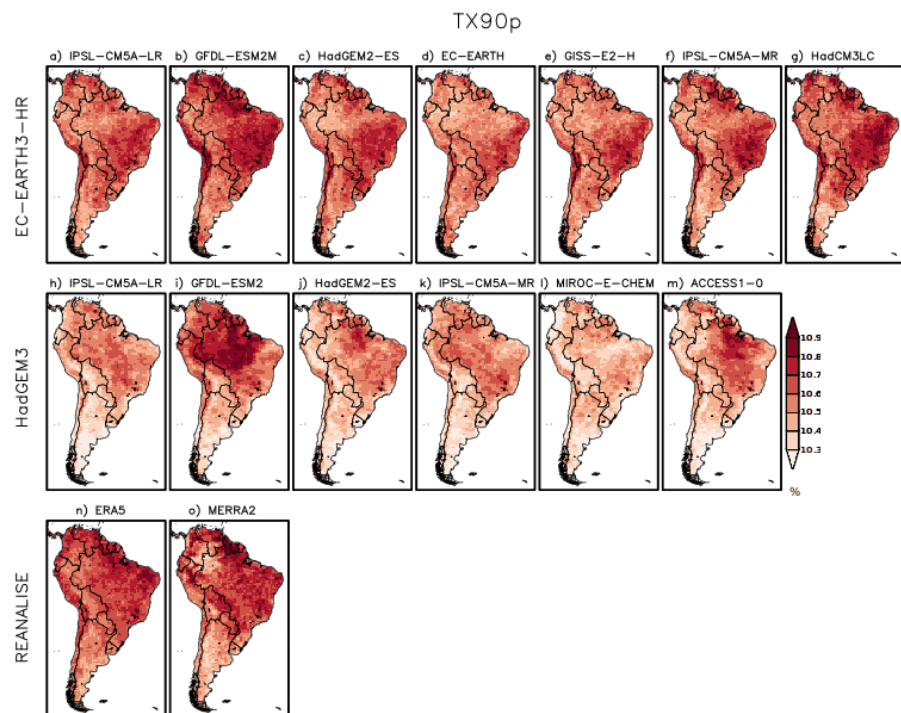


Figura A.13 - Climatologia média anual de TX90p (esquerda) e viés associado (direita), simulada pelos MCGs do HELIX para o período 1981-2010. A climatologia observada pelo MERRA-2 encontra-se no canto inferior direito. As áreas hachuradas correspondem a vieses significativos estatisticamente. As unidades estão em %.

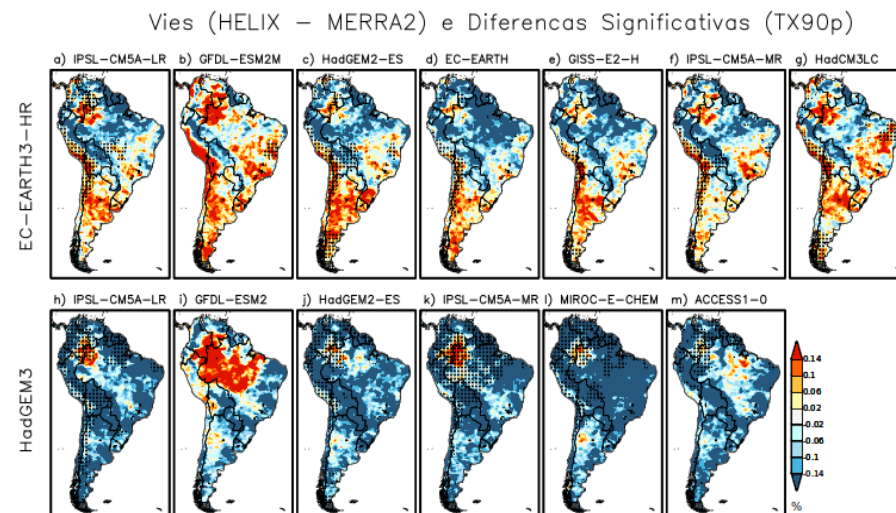
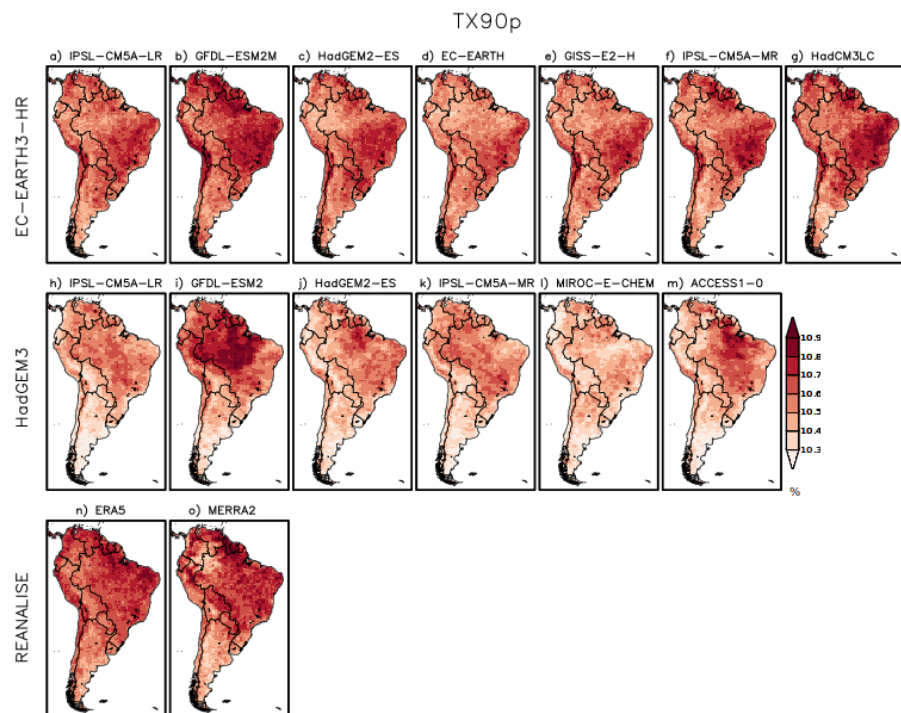


Figura A.14 - Climatologia média anual de WSDI (esquerda) e vies associado (direita), simulada pelos MCGs do HELIX para o período 1981-2010. A climatologia observada pelo ERA-5 encontra-se no canto inferior esquerdo. As áreas hachuradas correspondem a vieses significativos estatisticamente. As unidades estão em dias.

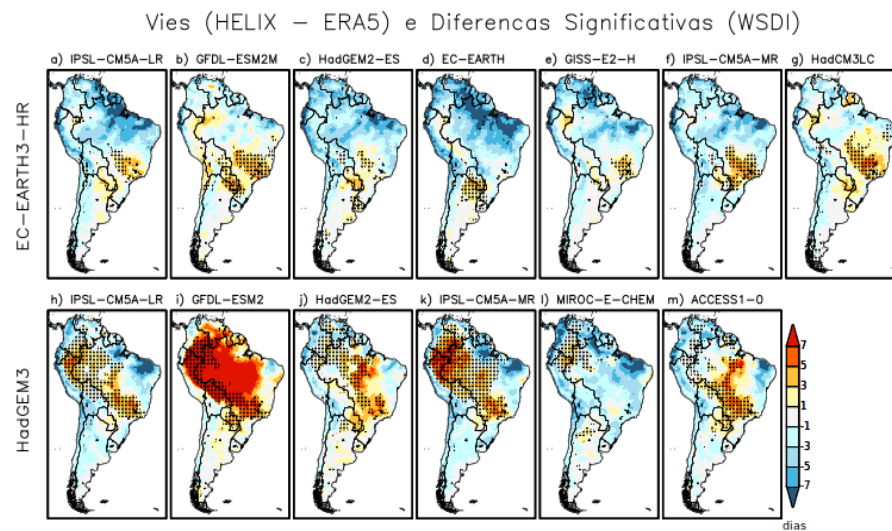
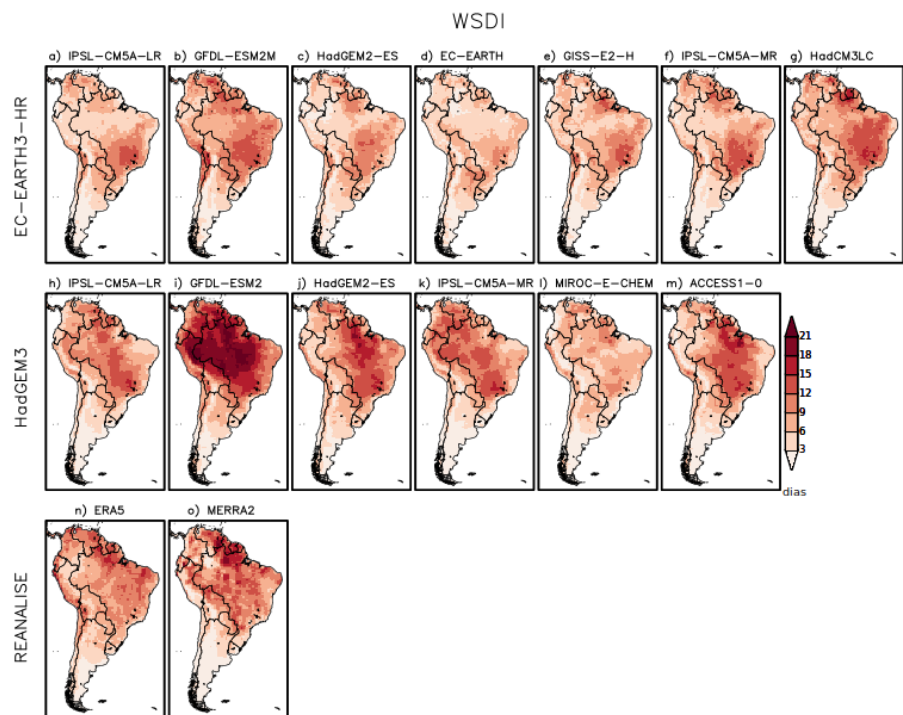
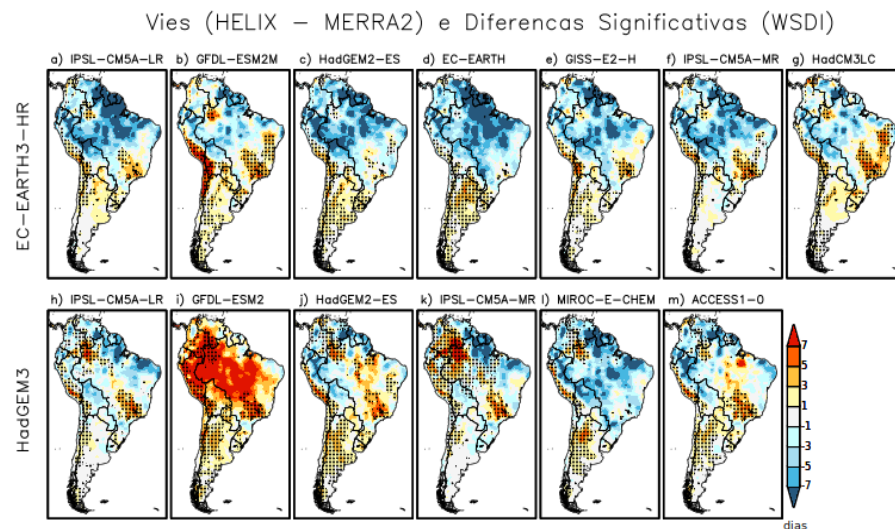
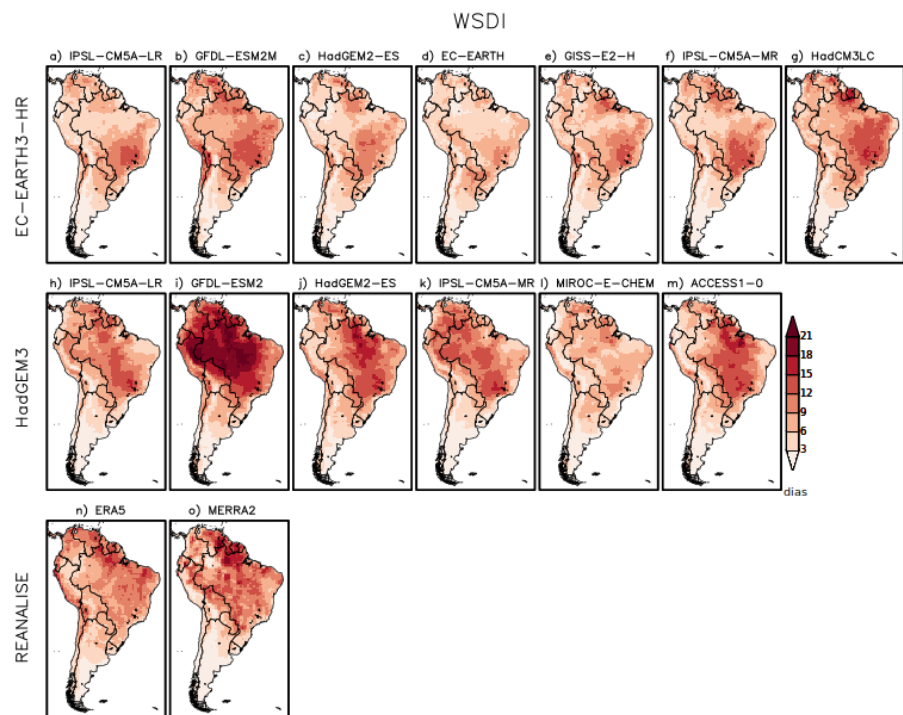


Figura A.15 - Climatologia média anual de WSDI (esquerda) e viés associado (direita), simulada pelos MCGs do HELIX para o período 1981-2010. A climatologia observada pelo MERRA-2 encontra-se no canto inferior direito. As áreas hachuradas correspondem a vieses significativos estatisticamente. As unidades estão em dias.



APÊNDICE B - PROJEÇÕES INDIVIDUAIS DOS MODELOS DO HELIX

Figura B.1 - Anomalias Futuras de CDD (dias) e sua significância para SWL 1.5 (superior), SWL 2.0 (centro) e SWL 4.0 (inferior), referentes às rodadas individuais dos modelos do HELIX. As áreas hachuradas correspondem a vieses significativos estatisticamente.

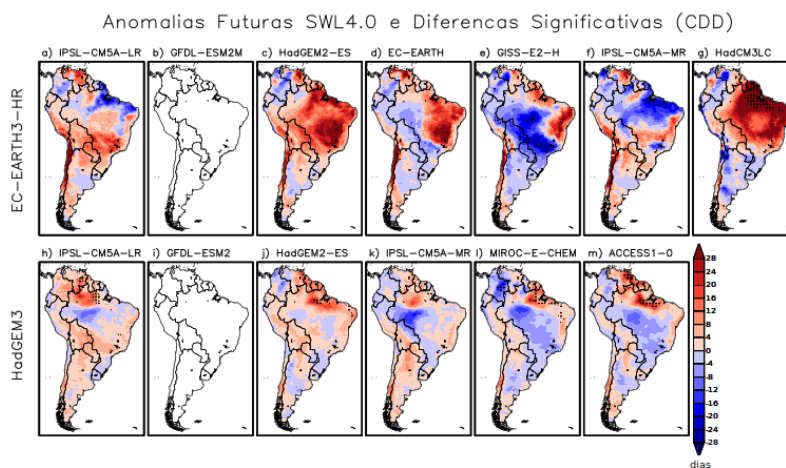
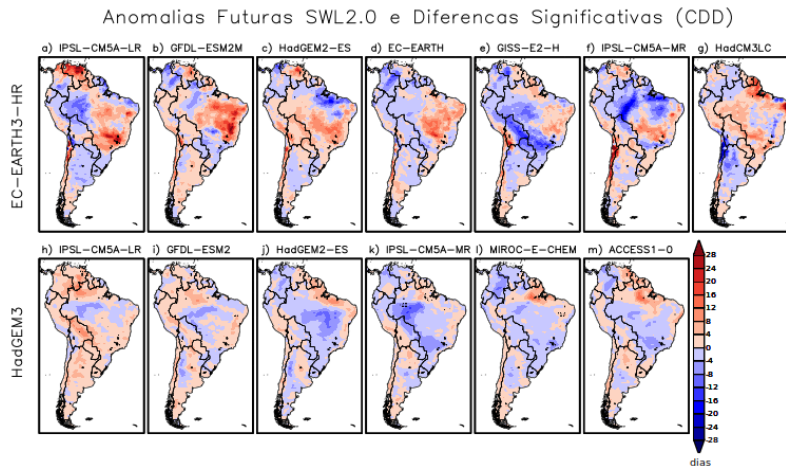
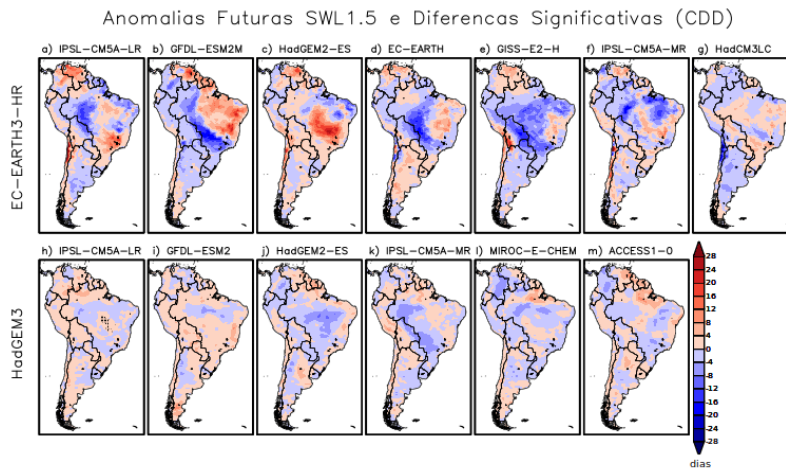


Figura B.2 - Anomalias Futuras de R10mm (dias) e sua significância para SWL 1.5 (superior), SWL 2.0 (centro) e SWL 4.0 (inferior), referentes às rodadas individuais dos modelos do HELIX. As áreas hachuradas correspondem a vieses significativos estatisticamente.

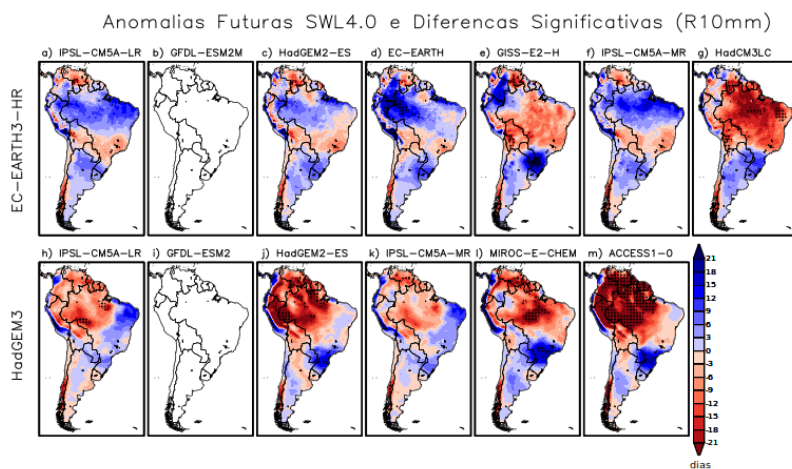
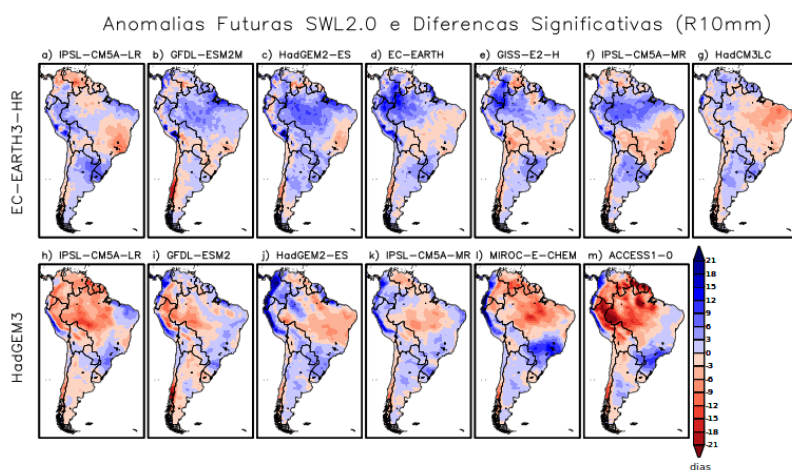
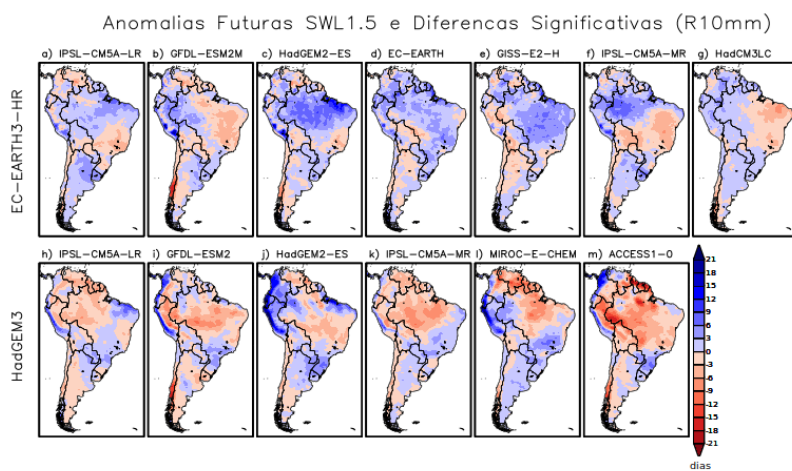


Figura B.3 - Anomalias Futuras de R30mm (dias) e sua significância para SWL 1.5 (superior), SWL 2.0 (centro) e SWL 4.0 (inferior), referentes às rodadas individuais dos modelos do HELIX. As áreas hachuradas correspondem a vieses significativos estatisticamente.

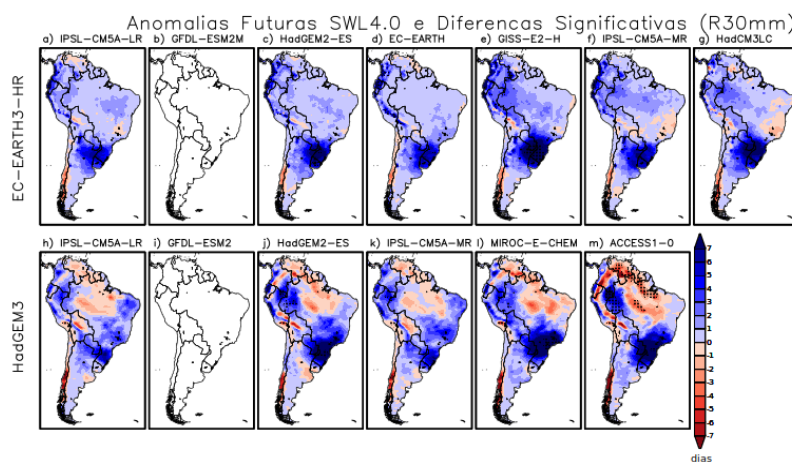
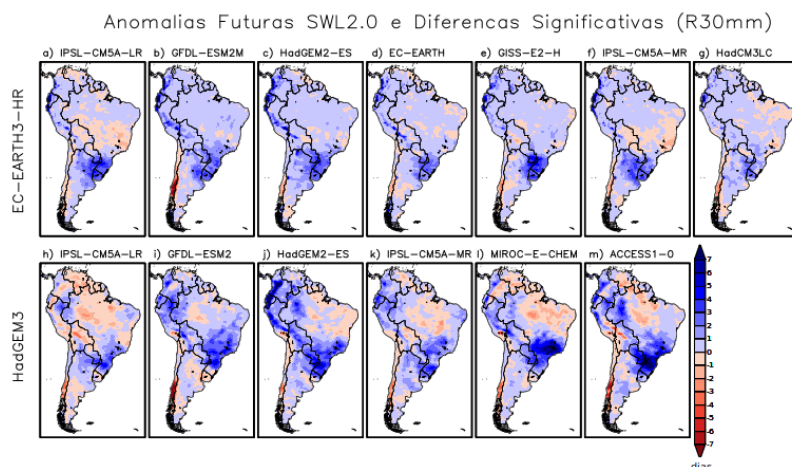
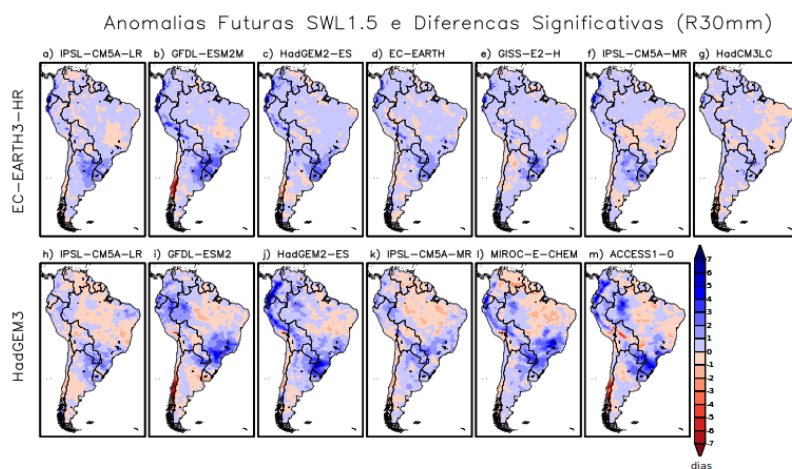


Figura B.4 - Anomalias Futuras de R95p (mm) e sua significância para SWL 1.5 (superior), SWL 2.0 (centro) e SWL 4.0 (inferior), referentes às rodadas individuais dos modelos do HELIX. As áreas hachuradas correspondem a vieses significativos estatisticamente.

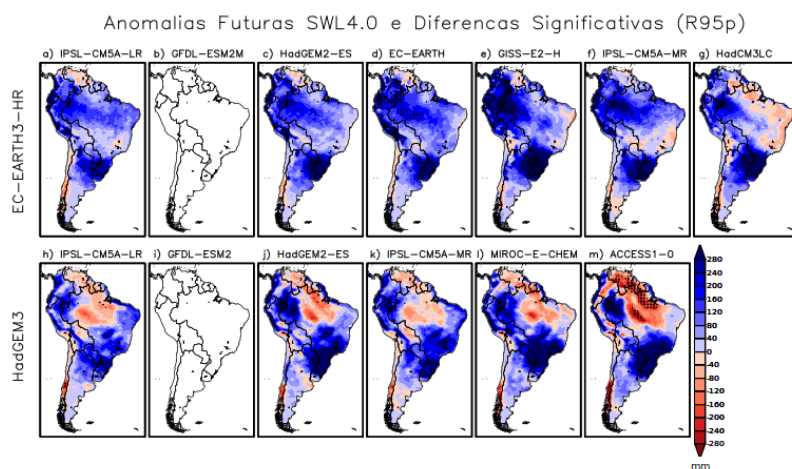
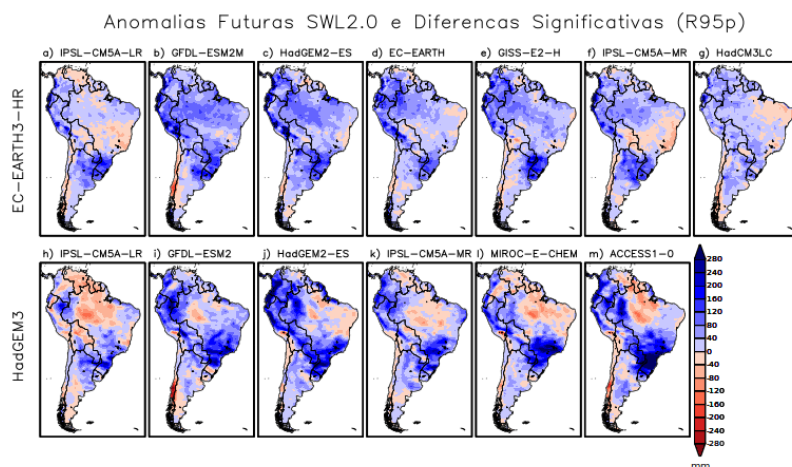
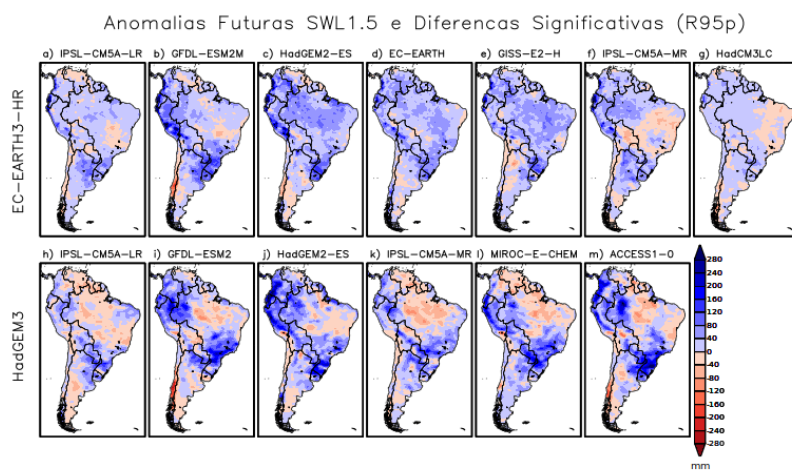


Figura B.5 - Anomalias Futuras de Rx5Day (mm) e sua significância para SWL 1.5 (superior), SWL 2.0 (centro) e SWL 4.0 (inferior), referentes às rodadas individuais dos modelos do HELIX. As áreas hachuradas correspondem a vieses significativos estatisticamente.

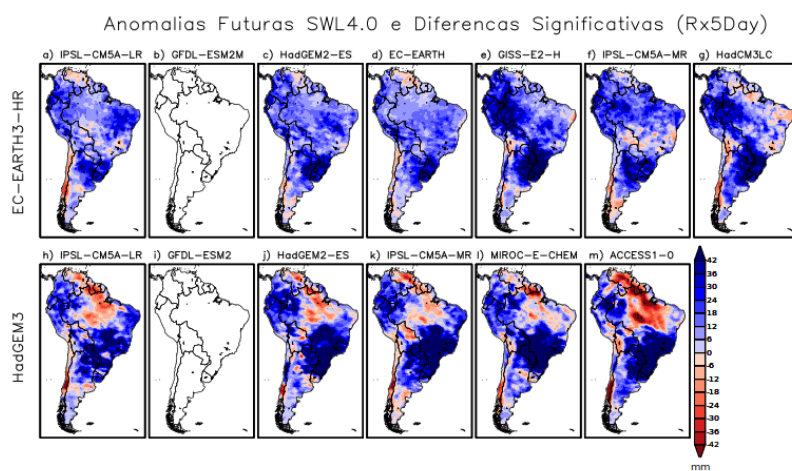
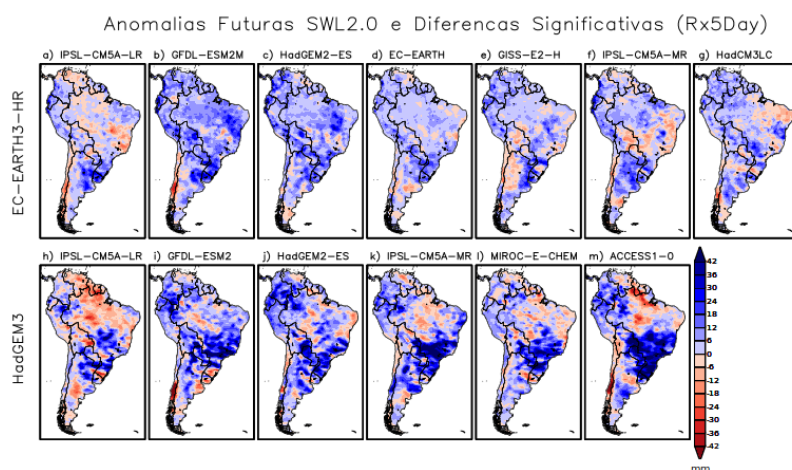
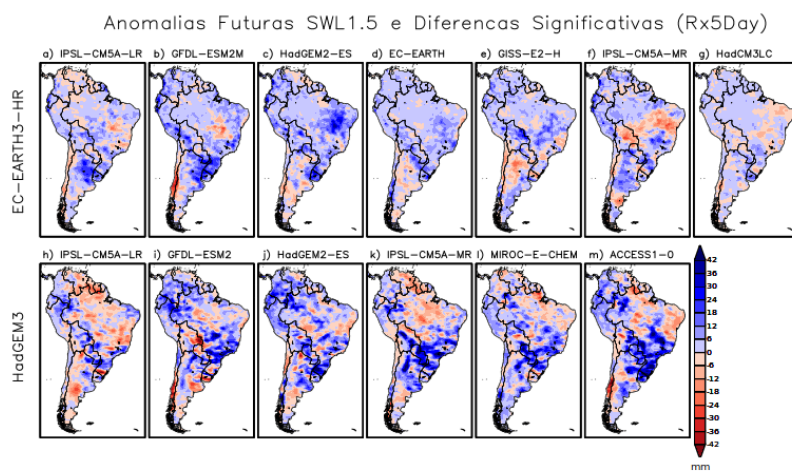


Figura B.6 - Anomalias Futuras de TN10p (%) e sua significância para SWL 1.5 (superior), SWL 2.0 (centro) e SWL 4.0 (inferior), referentes às rodadas individuais dos modelos do HELIX. As áreas hachuradas correspondem a vieses significativos estatisticamente.

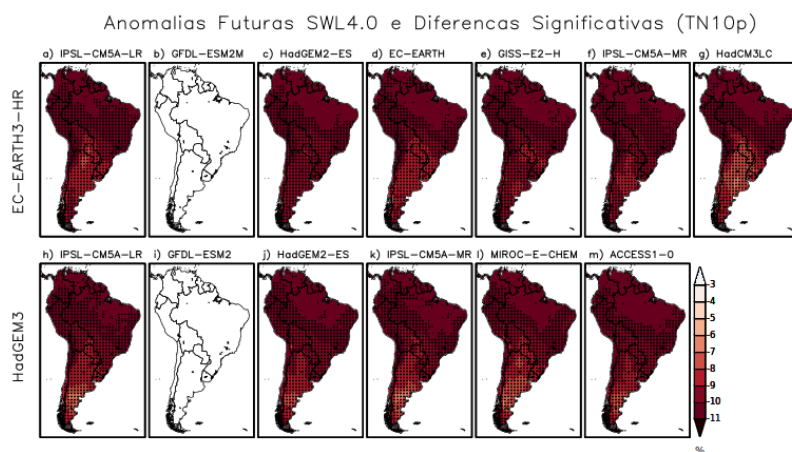
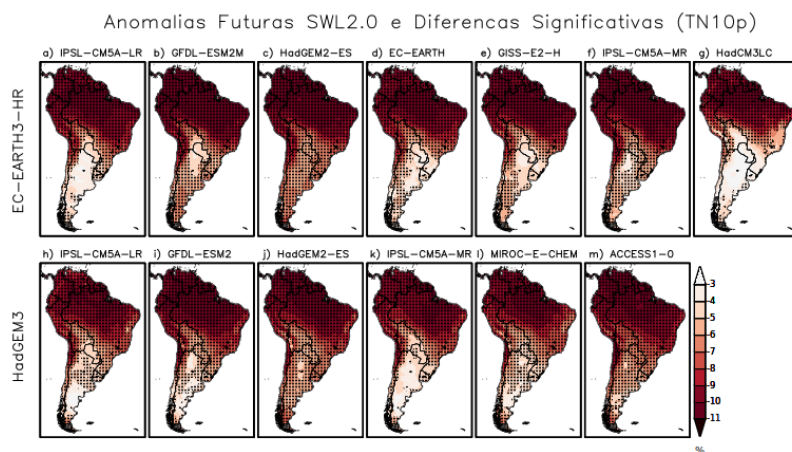
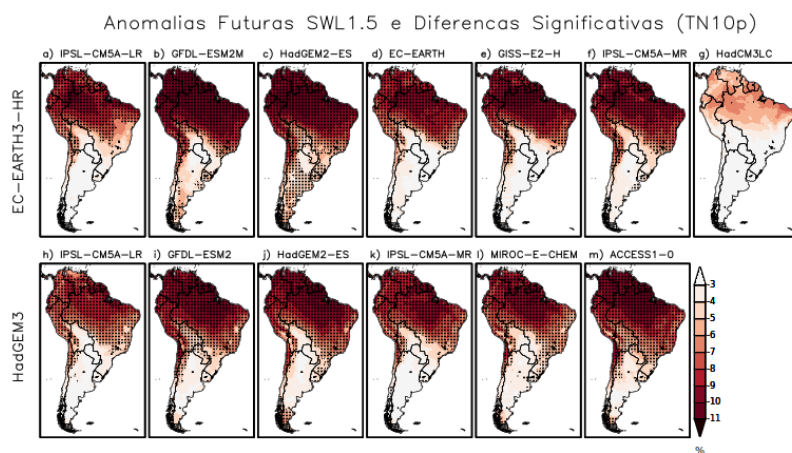


Figura B.7 - Anomalias Futuras de TN90p (%) e sua significância para SWL 1.5 (superior), SWL 2.0 (centro) e SWL 4.0 (inferior), referentes às rodadas individuais dos modelos do HELIX. As áreas hachuradas correspondem a vieses significativos estatisticamente.

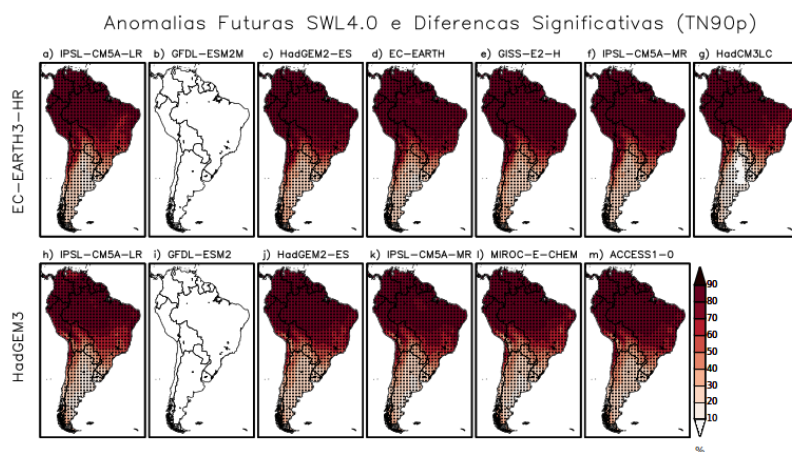
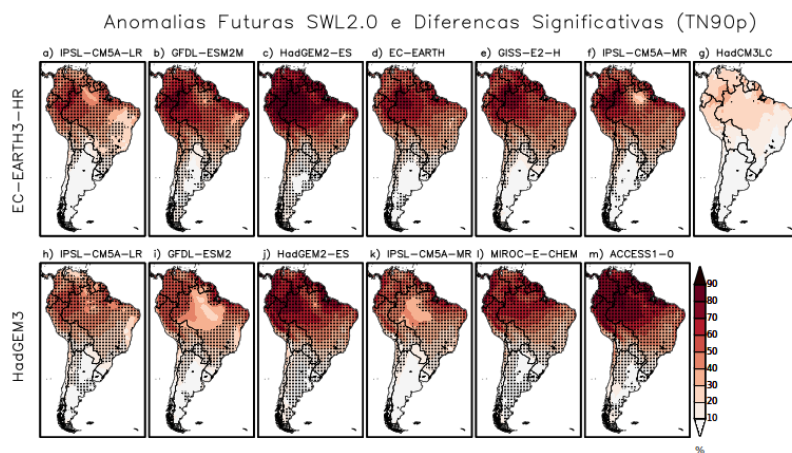
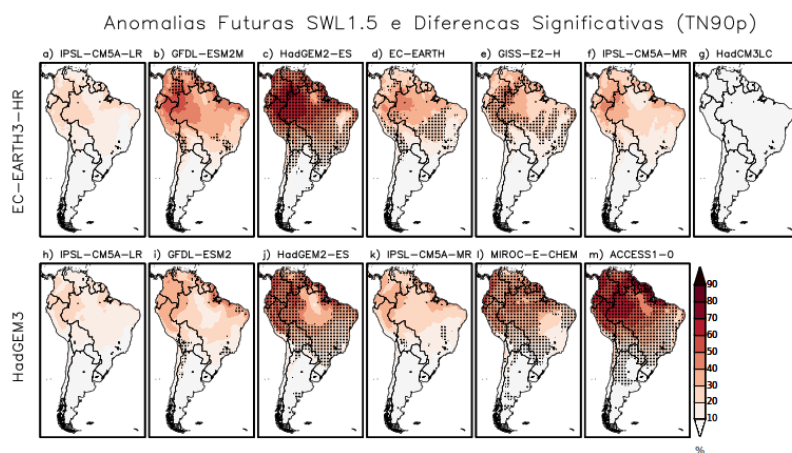


Figura B.8 - Anomalias Futuras de TX10p (%) e sua significância para SWL 1.5 (superior), SWL 2.0 (centro) e SWL 4.0 (inferior), referentes às rodadas individuais dos modelos do HELIX. As áreas hachuradas correspondem a vieses significativos estatisticamente.

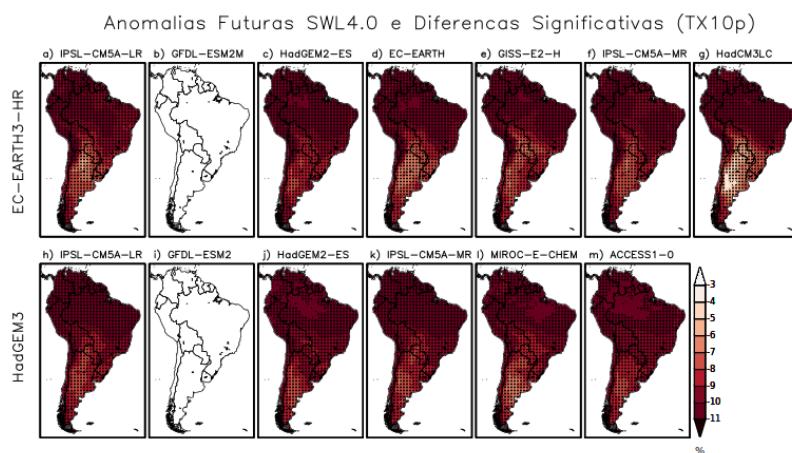
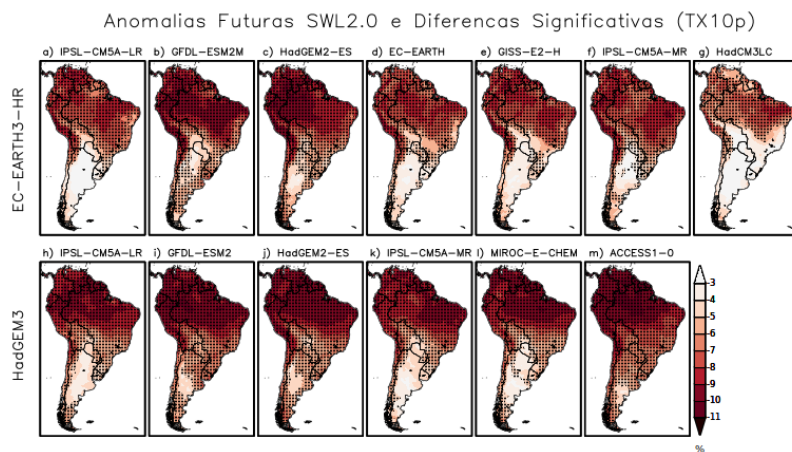
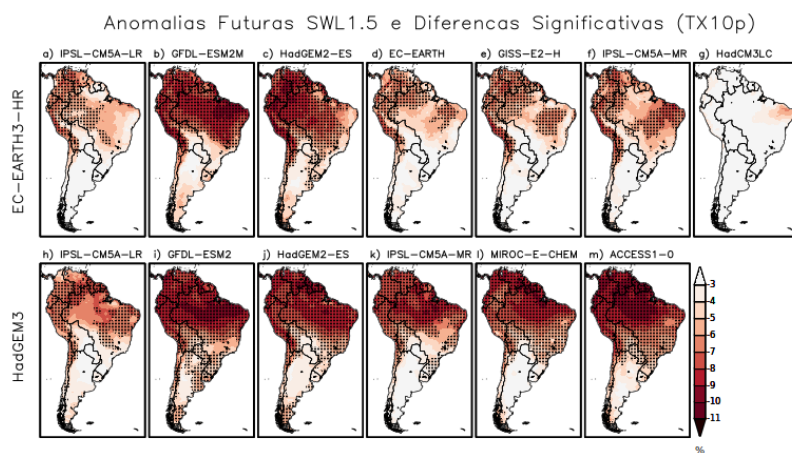


Figura B.9 - Anomalias Futuras de TX90p (%) e sua significância para SWL 1.5 (superior), SWL 2.0 (centro) e SWL 4.0 (inferior), referentes às rodadas individuais dos modelos do HELIX. As áreas hachuradas correspondem a vieses significativos estatisticamente.

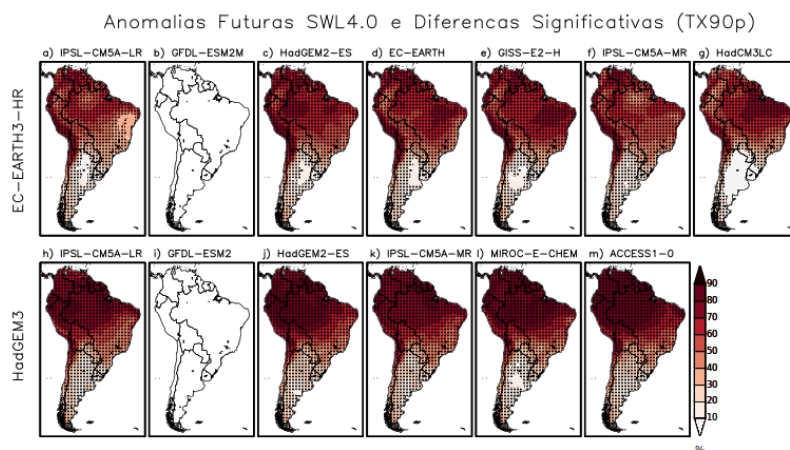
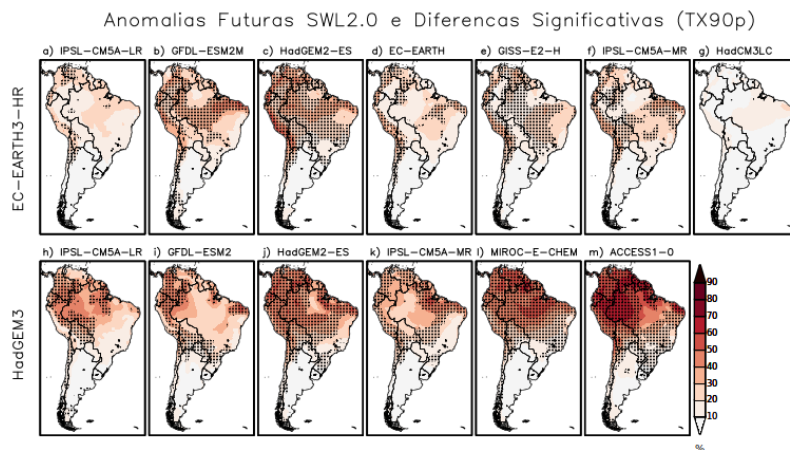
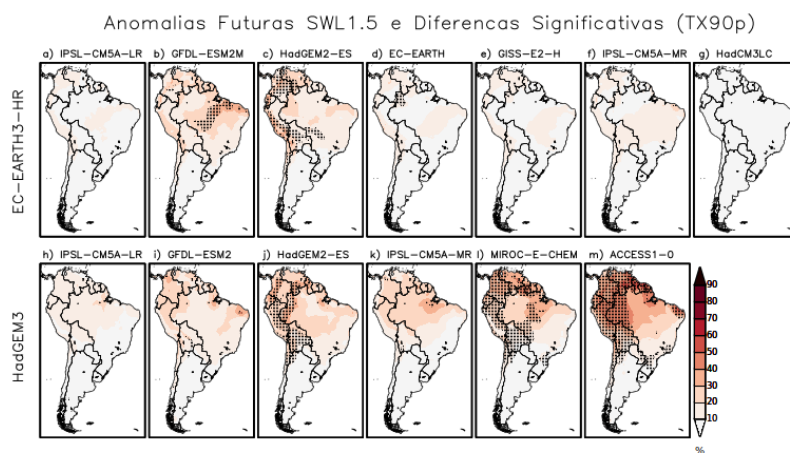
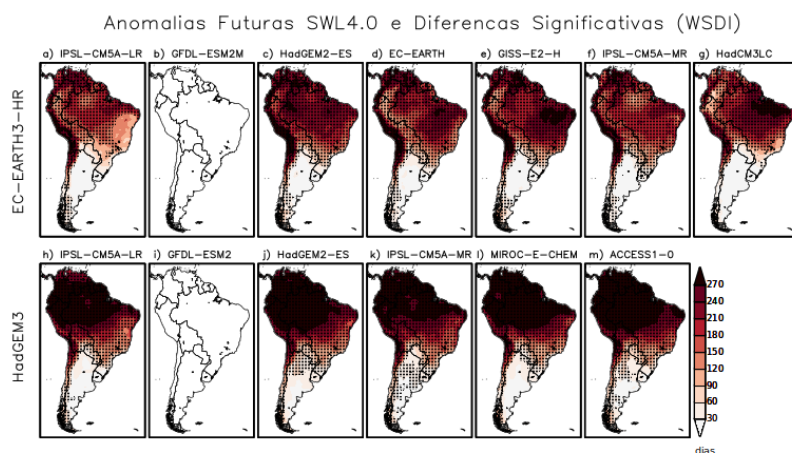
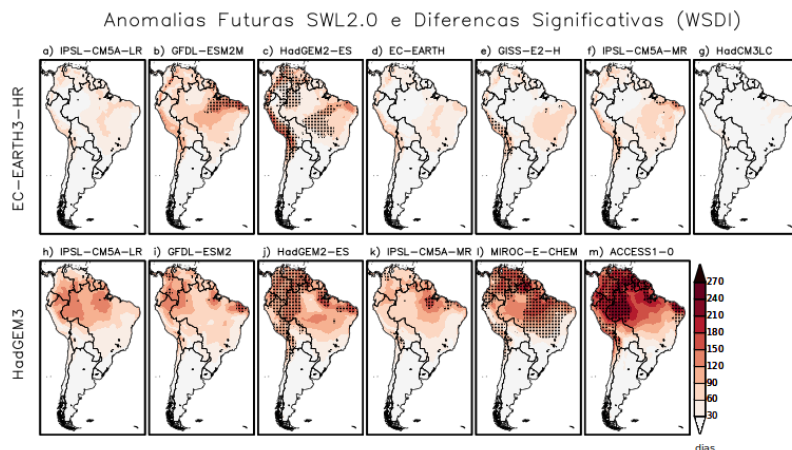
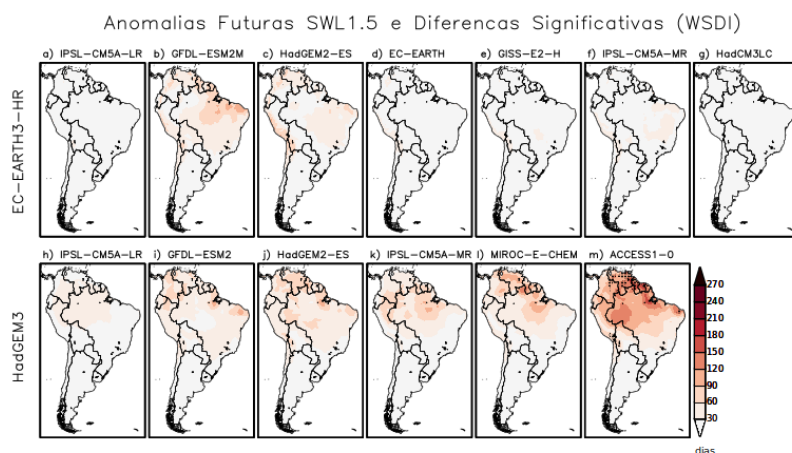


Figura B.10 - Anomalias Futuras de WSDI (dias) e sua significância para SWL 1.5 (superior), SWL 2.0 (centro) e SWL 4.0 (inferior), referentes às rodadas individuais dos modelos do HELIX. As áreas hachuradas correspondem a vieses significativos estatisticamente.



APÊNDICE C - TABELAS DE FRAÇÃO DE ÁREA DAS CLASSES DE MUDANÇAS

Tabela C.1 - Fração de área das classes de mudanças futuras (robusta, incerta, não-significativa) para cada SWL (1.5 °C, 2 °C e 4 °C) e regiões (AS, AMZ, NEB, S/SEB), referentes aos índices de precipitação para o ensemble EC-EARTH3-HR.

Índices de Precipitação - Ens. EC-EARTH3-HR						
ÍNDICES EXTREMOS	SWLs	CLASSES	REGIÕES			
			AS	AMZ	NEB	S/SEB
CDD	SWL1.5	Robusta	0	0	0	0
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	100	100	100	100
	SWL2.0	Robusta	0	0	0	0
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	100	100	100	100
	SWL4.0	Robusta	0	0	0	0
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	98,78	98,62	99,14	99,88
R10mm	SWL1.5	Robusta	0,01	0	0	0
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	99,9	100	100	100
	SWL2.0	Robusta	0,04	0,09	0	0
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	99,59	99,91	100	100
	SWL4.0	Robusta	0,55	0,65	0	0
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	96,7	98,34	96,86	99,54
R30mm	SWL1.5	Robusta	0	0	0	0
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	99,91	100	100	100
	SWL2.0	Robusta	0	0	0	0
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	99,82	100	100	100
	SWL4.0	Robusta	0,42	0	0	0
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	98,21	98,53	99,43	98,26
R95p	SWL1.5	Robusta	0,01	0	0	0
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	99,94	100	100	100
	SWL2.0	Robusta	0,01	0	0	0
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	99,57	99,82	100	100
	SWL4.0	Robusta	0,9	0,65	0	0
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	94,63	86,18	99,71	98,38
Rx5Day	SWL1.5	Robusta	0	0	0	0
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	99,96	100	100	100
	SWL2.0	Robusta	0,04	0	0	0
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	99,63	100	100	100
	SWL4.0	Robusta	0,29	0	0	0
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	98,73	99,63	100	100

Tabela C.2 - Fração de área das classes de mudanças futuras (robusta, incerta, não-significativa) para cada SWL (1.5 °C, 2 °C e 4 °C) e regiões (AS, AMZ, NEB, S/SEB), referentes aos índices de temperatura para o ensemble EC-EARTH3-HR.

Índices de Temperatura - Ens. EC-EARTH3-HR						
ÍNDICES EXTREMOS	SWLs	CLASSES	REGIÕES			
			AS	AMZ	NEB	S/SEB
TN10p	SWL1.5	Robusta	62,62	98,16	100	33,68
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	15,8	0	0	30,56
	SWL2.0	Robusta	90,93	100	100	89,35
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	0,46	0	0	0,46
	SWL4.0	Robusta	70,84	47,1	41,71	100
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	18,92	27,1	36,29	0
TN90p	SWL1.5	Robusta	5	0,46	0	2,66
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	64,49	46,73	37,43	76,39
	SWL2.0	Robusta	67,3	99,45	97,14	92,25
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	11,14	0	0	1,97
	SWL4.0	Robusta	100	100	100	100
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	0	0	0	0
TX10p	SWL1.5	Robusta	47,64	64,98	59,43	14,12
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	21,03	2,4	4	49,54
	SWL2.0	Robusta	88,04	100	99,14	87,96
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	3,12	0	0	0,46
	SWL4.0	Robusta	80,25	96,22	74,29	100
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	17,67	3,41	21,43	0
TX90p	SWL1.5	Robusta	7,82	0,37	3,71	0
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	81,8	92,63	67,43	98,15
	SWL2.0	Robusta	41,1	41,75	52	18,4
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	27,05	11,61	33,43	50,69
	SWL4.0	Robusta	96,99	98,89	100	97,57
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	0,56	0	0	0
WSDI	SWL1.5	Robusta	0	0	0	0
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	98,51	100	90	100
	SWL2.0	Robusta	14,58	4,42	33,43	0
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	78,02	90,69	56,86	98,03
	SWL4.0	Robusta	89,87	100	100	82,06
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	5,49	0	0	11,92

Tabela C.3 - Fração de área das classes de mudanças futuras (robusta, incerta, não-significativa) para cada SWL (1.5 °C, 2 °C e 4 °C) e regiões (AS, AMZ, NEB, S/SEB), referentes aos índices de precipitação para o ensemble HadGEM3.

Índices de Precipitação - Ens. HADGEM3						
ÍNDICES EXTREMOS	SWLs	CLASSES	REGIÕES			
			AS	AMZ	NEB	S/SEB
CDD	SWL1.5	Robusta	0	0	0	0
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	99,52	99,91	100	100
	SWL2.0	Robusta	0	0	0	0
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	99,44	99,35	98,29	100
	SWL4.0	Robusta	0,64	1,75	0,29	0
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	89,76	87,28	74,57	99,31
R10mm	SWL1.5	Robusta	0	0	0	0
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	100	100	100	100
	SWL2.0	Robusta	0	0	0	0
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	99,91	100	100	100
	SWL4.0	Robusta	2,3	4,79	0	0
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	77,15	48,29	94,29	97,45
R30mm	SWL1.5	Robusta	0	0	0	0
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	99,91	100	100	100
	SWL2.0	Robusta	0,04	0	0	0
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	99,87	100	100	100
	SWL4.0	Robusta	0,57	1,29	0	0
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	91,19	75,85	99,71	88,66
R95p	SWL1.5	Robusta	0	0	0	0
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	99,91	100	100	100
	SWL2.0	Robusta	0,01	0	0	0
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	99,9	100	100	100
	SWL4.0	Robusta	0,84	1,84	0	0
		Incerta	0,01	0,09	0	0
		Não-Significativa	88,01	76,22	98	94,79
Rx5Day	SWL1.5	Robusta	0	0	0	0
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	100	100	100	100
	SWL2.0	Robusta	0	0	0	0
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	100	100	100	100
	SWL4.0	Robusta	0,15	0	0	0
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	95,91	96,59	98,86	99,88

Tabela C.4 - Fração de área das classes de mudanças futuras (robusta, incerta, não-significativa) para cada SWL (1.5 °C, 2 °C e 4 °C) e regiões (AS, AMZ, NEB, S/SEB), referentes aos índices de temperatura para o ensemble HadGEM3.

Índices de Temperatura - Ens. HADGEM3						
ÍNDICES EXTREMOS	SWLs	CLASSES	REGIÕES			
			AS	AMZ	NEB	S/SEB
TN10p	SWL1.5	Robusta	67,74	97,97	97,71	64,81
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	13,73	0	0	18,98
	SWL2.0	Robusta	83,6	97,42	93,71	97,22
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	1,4	0,09	0	0
	SWL4.0	Robusta	69,91	48,2	60,57	100
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	17,42	17,97	27,14	0
TN90p	SWL1.5	Robusta	9,56	8,85	7,43	2,66
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	52,04	10,05	21,71	45,83
	SWL2.0	Robusta	61,21	97,88	100	78,01
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	14,02	0	0	3,94
	SWL4.0	Robusta	92,37	97,24	96,86	100
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	0,75	0,09	0,29	0
TX10p	SWL1.5	Robusta	63,7	99,08	97,43	64,35
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	11,52	0	0	9,61
	SWL2.0	Robusta	79,85	96,87	89,71	93,87
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	7,11	2,03	0,29	0,69
	SWL4.0	Robusta	79,25	93,46	72,86	100
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	14,83	3,59	25,43	0
TX90p	SWL1.5	Robusta	4,7	3,41	0	0
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	70,79	64,7	83,43	93,06
	SWL2.0	Robusta	44,42	54,75	58	25,58
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	22,39	1,38	10	17,94
	SWL4.0	Robusta	89,17	96,96	89,14	100
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	3,28	2,21	2,57	0
WSDI	SWL1.5	Robusta	0	0	0	0
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	91,81	95,67	88,57	100
	SWL2.0	Robusta	16,19	6,91	24,57	0
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	66,68	51,8	43,14	98,61
	SWL4.0	Robusta	91,29	100	100	90,97
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	1,51	0	0	0,81

Tabela C.5 - Fração de área das classes de mudanças futuras (robusta, incerta, não-significativa) para cada SWL (1.5 °C, 2 °C e 4 °C) e regiões (AS, AMZ, NEB, S/SEB), referentes aos índices de precipitação para o ensemble HELIX.

Índices de Precipitação - Ens. HELIX						
ÍNDICES EXTREMOS	SWLs	CLASSES	REGIÕES			
			AS	AMZ	NEB	S/SEB
CDD	SWL1.5	Robusta	0	0	0	0
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	99,97	100	100	100
	SWL2.0	Robusta	0	0	0	0
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	99,95	99,91	100	100
	SWL4.0	Robusta	0,01	0,09	0	0
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	98,53	95,58	99,43	100
R10mm	SWL1.5	Robusta	0	0	0	0
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	99,97	100	100	100
	SWL2.0	Robusta	0	0	0	0
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	99,92	99,91	100	100
	SWL4.0	Robusta	0,36	0,37	0	0
		Incerta	0,01	0	0	0
		Não-Significativa	93,92	90,78	98,86	100
R30mm	SWL1.5	Robusta	0	0	0	0
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	99,92	100	100	100
	SWL2.0	Robusta	0	0	0	0
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	99,89	100	100	100
	SWL4.0	Robusta	0,17	0	0	0
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	98,54	97,97	100	98,61
R95p	SWL1.5	Robusta	0	0	0	0
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	99,92	100	100	100
	SWL2.0	Robusta	0	0	0	0
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	99,76	99,91	100	100
	SWL4.0	Robusta	0,61	0,28	0	0
		Incerta	0,09	0	0	0
		Não-Significativa	96,04	90,78	100	99,88
Rx5Day	SWL1.5	Robusta	0	0	0	0
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	100	100	100	100
	SWL2.0	Robusta	0	0	0	0
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	99,85	100	100	100
	SWL4.0	Robusta	0,11	0	0	0
		Incerta	0,01	0	0	0
		Não-Significativa	99,21	99,91	100	100

Tabela C.6 - Fração de área das classes de mudanças futuras (robusta, incerta, não-significativa) para cada SWL (1.5 °C, 2 °C e 4 °C) e regiões (AS, AMZ, NEB, S/SEB), referentes aos índices de temperatura para o ensemble HELIX.

Índices de Temperatura - Ens. HELIX						
ÍNDICES EXTREMOS	SWLs	CLASSES	REGIÕES			
			AS	AMZ	NEB	S/SEB
TN10p	SWL1.5	Robusta	68,61	98,25	100	61,23
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	10,19	0	0	20,37
	SWL2.0	Robusta	93,57	100	100	94,56
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	0,05	0	0	0
	SWL4.0	Robusta	71,18	48,39	50,57	100
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	19,95	27,37	28,86	0
TN90p	SWL1.5	Robusta	7,51	2,12	1,43	1,85
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	50,06	9,86	14	43,87
	SWL2.0	Robusta	67,51	100	100	90,51
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	9,32	0	0	1,85
	SWL4.0	Robusta	100	100	100	100
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	0	0	0	0
TX10p	SWL1.5	Robusta	62,76	96,41	93,71	42,25
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	10,87	0	0	14,58
	SWL2.0	Robusta	88,99	98,62	100	94,1
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	1,14	0	0	0
	SWL4.0	Robusta	80,4	96,31	74	100
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	17,74	3,41	24,57	0
TX90p	SWL1.5	Robusta	8,23	3,32	1,14	0
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	73,1	75,76	71,14	96,64
	SWL2.0	Robusta	47,35	52,26	58,29	23,73
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	19,63	1,47	12,57	24,19
	SWL4.0	Robusta	96,05	98,06	97,71	100
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	0,15	0,18	0	0
WSDI	SWL1.5	Robusta	0	0	0	0
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	92,82	96,04	86	100
	SWL2.0	Robusta	15,18	4,61	31,71	0
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	68,35	61,75	46,29	97,8
	SWL4.0	Robusta	91,9	100	100	86,34
		Incerta	0	0	0	0
		Não-Significativa	4,18	0	0	6,6