

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO,**  
**MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS**

**AVALIAÇÃO DAS ALTERAÇÕES NAS**  
**FREQUÊNCIAS DE OCORRÊNCIA DAS**  
**PRECIPITAÇÕES DIÁRIAS MÁXIMAS PARA**  
**A REGIÃO METROPOLITANA DE BELO**  
**HORIZONTE CONSIDERANDO DIFERENTES**  
**CENÁRIOS DE CLIMAS FUTUROS.**

**David Antonio Jimenez Osorio**

**Belo Horizonte**

**2022**

**David Antonio Jimenez Osorio**

**AVALIAÇÃO DAS ALTERAÇÕES NAS  
FREQUÊNCIAS DE OCORRÊNCIA DAS  
PRECIPITAÇÕES DIÁRIAS MÁXIMAS PARA A  
REGIÃO METROPOLITANA DE BELO HORIZONTE  
CONSIDERANDO DIFERENTES CENÁRIOS DE  
CLIMAS FUTUROS.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Recursos Hídricos

Linha de pesquisa: Modelagem de Processos Hidrológicos

Orientador: Prof. Dr. Eber José de Andrade Pinto

Coorientador: Prof Dr. Bruno Melo Brentan

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2022

O83a

Osorio, David Antonio Jimenez.

Avaliação das alterações nas frequências de ocorrência das precipitações diárias máximas para a Região Metropolitana de Belo Horizonte considerando diferentes cenários de climas futuros / David Antonio Jimenez Osorio. - 2022.

1 recurso online (156 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Eber José de Andrade Pinto.

Coorientador: Bruno Melo Brentan.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Anexos: f. 113-177.

Bibliografia: f. 107-112.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia sanitária - Teses. 2. Recursos hídricos - Desenvolvimento - Teses. 3. Mudanças climáticas - Teses. 4. Precipitação (Meteorologia) - Teses. I. Pinto, Eber José de Andrade. II. Brentan, Bruno Melo. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 628(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
[ESCOLA DE ENGENHARIA]  
COLEGIADO DO CURSO DE GRADUAÇÃO / PÓS-GRADUAÇÃO EM [SANEAMENTO, MEIO AMBIENTE E RECURSOS  
HÍDRICOS]

## FOLHA DE APROVAÇÃO

**["AVALIAÇÃO DAS ALTERAÇÕES NAS FREQUÊNCIAS DE OCORRÊNCIA DAS PRECIPITAÇÕES DIÁRIAS  
MÁXIMAS A REGIÃO METROPOLITANA DE BELO HORIZONTE CONSIDERANDO DIFERENTES CENÁRIOS  
DE CLIM"]**

**[DAVID ANTONIO JIMENEZ OSORIO]**

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada, no dia [ 28 de abril de 2022], pela Banca Examinadora designada pelo [Colegiado do Programa de Pós-Graduação **EM SANEAMENTO, MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS**] da Universidade Federal de Minas Gerais constituída pelos seguintes professores:

Prof. Eber José de Andrade Pinto - UFMG

Prof<sup>ª</sup>. Weronica Meira de Souza - UFRPE

Prof<sup>ª</sup>. Talita Fernanda das Graças Silva - UFMG

Prof. Bruno Melo Betran - UFMG

APROVADA PELO COLEGIADO DO PPG SMARH

Sonaly Cristina Rezende Borges de Lima - Coordenadora

Belo Horizonte, 28 de abril de 2022.

---

Documento assinado eletronicamente por **Talita Fernanda das Gracas Silva, Professora do**



**Magistério Superior**, em 28/04/2022, às 17:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Bruno Melo Brentan, Professor do Magistério Superior**, em 28/04/2022, às 17:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Eber Jose de Andrade Pinto, Professor do Magistério Superior**, em 28/04/2022, às 17:08, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Werônica Meira de Souza, Usuária Externa**, em 19/05/2022, às 08:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufmg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1412743** e o código CRC **9676DF85**.

## **DEDICATÓRIA**

A mi madre, de quien aprendí que no existen límites cuando de soñar se trata, porque con esfuerzo y esperanza, lo imposible se puede alcanzar. A mi padre, de quien aprendí a ser un hombre de bien. A mi hermano, que me recuerda que rendirme no es una opción, porque hay alguien que sigue mis pasos. A Fredy Osorio, quien ha brindado su apoyo incondicional a mi familia. A Nidia Toro y Miller Jimenez quienes siempre han creído y apostado en mis sueños. A Catalina Caballero, quien con su sonrisa me inspira a conquistar el mundo y me hace sentir que todo es posible. A la Familia Toro Huertas, de quienes aprendí que en equipo todo se logra y no existen barreras.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeramente, agradezco a Dios y al Brasil por esta increíble oportunidad, a los mineiros por su hospitalidad y cariño, porque aún en la distancia lograban hacerme sentir en casa. A Izabela Jesuino y Maria Clara Alves, quienes se convirtieron en mi principal apoyo.

A Rogerio Oliveira, quien me acogió en su casa como quien recibe a un hermano. A Rosa Dori y Jaime Garzón, que me brindaron su apoyo en el momento más crítico de este proceso. A los Maia, quienes me adoptaron como miembro activo de la familia.

A mi orientador Eber José de Andrade por su paciencia, dedicación y apoyo. A mi co-orientador Bruno Melo, a quien admiro y respeto, no solo por ser un excelente académico, si no un gran ser humano.

A mis compañeros de curso, Alan Barbosa, Rodrigo Perdigão y Thomas Anchieta, por su apoyo y compañerismo durante este proceso.

A María Duarte, Paula Carrillo, Ivón Gil y Angie Montañez quienes me apoyaron en los momentos más difíciles de este proceso.

Al Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), por el apoyo y financiación.

A todos aquellos que contribuyeron de alguna forma en este proceso.

## RESUMO

As mudanças climáticas geram alterações no regime de chuvas, que se caracterizam por mudanças nas frequências e intensidades das precipitações, tanto no nível diário como subdiário. Neste contexto, o projeto de intercomparação de Modelos acoplados (CMIP) tenta entender melhor as mudanças climáticas passadas, presentes e futuras, que surgem da variabilidade natural ou como respostas às mudanças na forçante radiativa, a partir da modelagem climática de cenários de emissão de gases efeito estufa. Neste contexto, o presente trabalho procura avaliar as possíveis alterações nas frequências de ocorrência das precipitações diárias máximas por ano hidrológico na região metropolitana de Belo Horizonte (RMBH), que se apresentariam sob a ocorrência dos cenários de emissão SSP1-2.6 e SSP5-8.5, no curto (2016-2043), médio (2044-2071) e longo (2072-2099) prazo, considerando condições climáticas Frias-Úmidas (FU), Frias-Secas (FS), Quentes-Secas (QS) e Quentes-Úmidas (QU). Com o propósito de alcançar o objetivo planejado foram avaliadas técnicas de redução de escala ou “*Downscaling*” baseadas em Árvores de regressão (AR), Programação Genética (PG), Mapeamento de Quantis (QQ) e o Método Delta. Os resultados mostraram que para a RMBH as técnicas baseadas em AR foram a melhor opção para desenvolver estudos que visem em identificar alterações na frequência de ocorrência das precipitações máximas diárias, num contexto de mudanças climáticas. Entretanto, no caso dos estudos que objetivam identificar alterações tanto do número de dias chuvosos como da precipitação total por ano hidrológico deverão ser analisados enfoques de *Downscaling* diferentes aos baseados em AR, PG, QQ e o Método Delta. O desenvolvimento das análises de frequência, permitiu identificar que, em termos gerais os Quantis de precipitação máxima diária projetados no curto, médio e longo prazo, se encontram dentre os intervalos de confiança (IC) dos Quantis históricos, não obstante, em alguns casos são projetados valores superiores e inferiores aos ICs. Assim mesmo, foi percebido que os incrementos e diminuições das intensidades projetadas em cada cenário de emissão variam com o tempo de retorno, em termos gerais se percebe que quanto maior for o tempo de retorno, maiores são as alterações projetadas.

**Palavras Chaves:** *Downscaling*, Mudanças Climáticas, CMIP6, SSP1-2.6, SSP5-8.5

## ABSTRACT

Climate change generates alterations in the rainfall regime, which are characterized by variations in the frequencies and intensities of precipitation, both at the daily and subdaily level. In this context, the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP) attempts to better understand past, present, and future climate changes that arise from natural variability or as responses to changes in radiative forcing, from climate modeling of greenhouse gas emission scenarios. In this context, the present work seeks to evaluate the possible changes in the frequencies of occurrence of maximum daily precipitation per hydrological year in the metropolitan region of Belo Horizonte (RMBH), which would present themselves under the occurrence of emission scenarios SSP1-2.6 and SSP5-8.5, in the short (2016-2043), medium (2044-2071) and long (2072-2099) term, considering Cold-Wet (FU), Cold-Dry (FS), Hot-Dry (QS) and Hot-Wet (QU) climate conditions. In order to achieve the planned objective, Downscaling techniques based on Regression Trees (RT), Genetic Programming (GP), Quantile Mapping (QM) and the Delta Method were evaluated. The results showed that for the RMBH the RA-based techniques were the best option to develop studies aiming at identifying changes in the frequency of occurrence of daily maximum rainfall, in a context of climate change. However, in the case of studies that aim to identify changes both in the number of rainy days and in the total precipitation per hydrological year, Downscaling approaches other than those based on RT, GP, QM and the Delta Method should be analyzed. The development of the frequency analysis allowed us to identify that, in general terms, the quantiles of maximum daily precipitation projected in the short, medium, and long term are within the confidence intervals (CI) of the historical quantiles, although in some cases values are projected higher and lower than the CI. Likewise, it was perceived that the increases and decreases of the projected intensities in each emission scenario vary with the return time, however, in general terms it is perceived that the longer the return time, the greater are the projected changes.

**Keywords:** Downscaling, Climate Change, CMIP6, SSP1-2.6, SSP5-8.5

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 3-1 Discretização espacial dos modelos de circulação Geral.....  | 21 |
| Figura 3-2 Etapas de simulação das condições climáticas futuras .....   | 22 |
| Figura 3-3 Representação dos programas na PG.....   | 26 |
| Figura 4-1 Fluxograma das etapas metodológicas .....  | 38 |
| Figura 4-2 Localização da área de estudo .....  | 39 |
| Figura 4-3 Temperatura média diária mensal da RMBH .....  | 40 |
| Figura 4-4 Precipitação média mensal da RMBH.....   | 40 |
| Figura 4-5 Localização das estações 02043057 e 02043042.....  | 42 |
| Figura 4-6 Estações pluviométricas Empregadas na análise de consistência.....   | 42 |
| Figura 5-1 Simulações que projetam as maiores alterações das condições climáticas médias para o final do século XXI.....                          | 55 |
| Figura 5-2 Métricas de erro médias da precipitação total por ano hidrológico e número de dias chuvosos – Sem Downscaling Cenário SSP1-2.6 .....   | 63 |
| Figura 5-3 - Métricas de erro médias da precipitação total por ano hidrológico e número de dias chuvosos – Sem Downscaling Cenário SSP5-8.5 ..... | 63 |
| Figura 5-4 Métricas de erro médias da precipitação total por ano hidrológico e número de dias chuvosos – Método Delta Cenário SSP1-2.6 .....      | 64 |
| Figura 5-5 - Métricas de erro médias da precipitação total por ano hidrológico e número de dias chuvosos – Método Delta Cenário SSP5-8.5 .....    | 64 |
| Figura 5-6 Métricas de erro médias da precipitação total por ano hidrológico e número de dias chuvosos – QQ Cenário SSP1-2.6 .....                | 65 |
| Figura 5-7 - Métricas de erro médias da precipitação total por ano hidrológico e número de dias chuvosos – QQ Cenário SSP5-8.5 .....              | 65 |
| Figura 5-8 - Métricas de erro médias da precipitação total por ano hidrológico e número de dias chuvosos – AR Cenário SSP1-2.6.....               | 66 |
| Figura 5-9 - Métricas de erro médias da precipitação total por ano hidrológico e número de dias chuvosos – AR Cenário SSP5-8.5.....               | 66 |
| Figura 5-10 - Métricas de erro médias da precipitação total por ano hidrológico e número de dias chuvosos – PG Cenário SSP1-2.6 .....             | 67 |
| Figura 5-11 - Métricas de erro médias da precipitação total por ano hidrológico e número de dias chuvosos – PG Cenário SSP5-8.5 .....             | 67 |
| Figura 5-12 – Métricas de erro médias da análise de frequência, cenário de emissão SSP1-2.6, técnica de Downscaling Método Delta. ....            | 70 |
| Figura 5-13 – Métricas de erro médias da análise de frequência, cenário de emissão SSP5-8.5, técnica de Downscaling Delta. ....                   | 70 |
| Figura 5-14 – Métricas de erro médias da análise de frequência, cenário de emissão SSP1-2.6, técnica de Downscaling QQ. ....                      | 71 |
| Figura 5-15 – Métricas de erro médias da análise de frequência, cenário de emissão SSP5-8.5, técnica de Downscaling QQ. ....                      | 71 |
| Figura 5-16 – Métricas de erro médias da análise de frequência, cenário de emissão SSP1-2.6, técnica de Downscaling AR. ....                      | 72 |
| Figura 5-17 – Métricas de erro médias da análise de frequência, cenário de emissão SSP5-8.5, técnica de Downscaling AR. ....                      | 72 |
| Figura 5-18 – Métricas de erro médias da análise de frequência, cenário de emissão SSP1-2.6, técnica de Downscaling PG.....                       | 73 |
| Figura 5-19 – Métricas de erro médias da análise de frequência, cenário de emissão SSP5-8.5, técnica de Downscaling PG.....                       | 73 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 5-20 – Boxplot da frequência de ocorrência das PDMA observadas e simuladas no cenário de emissões SSP1-2.6 .....   | 74  |
| Figura 5-21 – Boxplot da frequência de ocorrência das PDMA observadas e simuladas no cenário de emissões SSP5-8.5 .....   | 75  |
| Figura 5-22 – Resultados do teste de aderência do período histórico e futuro.....   | 78  |
| Figura 5-23 Tempos de retorno das mesmas alturas de PDMA das séries históricas e das simuladas para o cenário de emissão SSP5-8.5 no curto prazo (2016-2043)..... | 81  |
| Figura 5-24 Tempos de retorno das mesmas alturas de PDMA das séries históricas e das simuladas para o cenário de emissão SSP1-2.6 no curto prazo (2016-2043)..... | 82  |
| Figura 5-25 Tempos de retorno das mesmas alturas de PDMA das séries históricas e das simuladas para o cenário de emissão SSP5-8.5 no médio prazo (2044-2072)..... | 85  |
| Figura 5-26 Tempos de retorno das mesmas alturas de PDMA das séries históricas e das simuladas para o cenário de emissão SSP1-2.6 no médio prazo (2044-2072)..... | 86  |
| Figura 5-27 Tempos de retorno das mesmas alturas de PDMA das séries históricas e das simuladas para o cenário de emissão SSP5-8.5 no longo prazo (2072-2073)..... | 89  |
| Figura 5-28 Tempos de retorno das mesmas alturas de PDMA das séries históricas e das simuladas para o cenário de emissão SSP1-2.6 no longo prazo (2072-2073)..... | 90  |
| Figura 5-29 Alterações médias projetadas das precipitações diárias para o período 2016-2043, sob a ocorrência de um clima QU. ....                                | 93  |
| Figura 5-30 Alterações médias projetadas das precipitações diárias para o período 2044-2071, sob a ocorrência de um clima QU. ....                                | 94  |
| Figura 5-31 Alterações médias projetadas das precipitações diárias para o período 2072-2099, sob a ocorrência de um clima QU. ....                                | 95  |
| Figura 5-32 Alterações médias projetadas das precipitações diárias para o período 2016-2043, sob a ocorrência de um clima QS. ....                                | 96  |
| Figura 5-33 Alterações médias projetadas das precipitações diárias para o período 2044-2071, sob a ocorrência de um clima QS. ....                                | 97  |
| Figura 5-34 Alterações médias projetadas das precipitações diárias para o período 2072-2099, sob a ocorrência de um clima QS. ....                                | 98  |
| Figura 5-35 Alterações médias projetadas das precipitações diárias para o período 2016-2043, sob a ocorrência de um clima FU. ....                                | 99  |
| Figura 5-36 Alterações médias projetadas das precipitações diárias para o período 2044-2071, sob a ocorrência de um clima FU. ....                                | 99  |
| Figura 5-37 Alterações médias projetadas das precipitações diárias para o período 2072-2099, sob a ocorrência de um clima FU. ....                                | 100 |
| Figura 5-38 Alterações médias projetadas das precipitações diárias para o período 2016-2043, sob a ocorrência de um clima FS.....                                 | 101 |
| Figura 5-39 Alterações médias projetadas das precipitações diárias para o período 2044-2071, sob a ocorrência de um clima FS.....                                 | 101 |
| Figura 5-40 Alterações médias projetadas das precipitações diárias para o período 2072-2099, sob a ocorrência de um clima FS.....                                 | 102 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 3-1 Cenários de emissão contemplados no CMIP6 .....  | 19 |
| Continuação da Tabela 3-2 Cenários de emissão contemplados no CMIP6 .....   | 20 |
| Tabela 3-3 Condições climáticas de temperatura média anual projetadas para o 2100 em cada um dos cenários de emissão.....   | 20 |
| Tabela 4-1 Estações empregadas na análise de consistência.....  | 43 |
| Tabela 4-2 Pontos centrais dos climas futuros .....   | 46 |
| Tabela 4-3 Índices do ETCCDI contemplados na avaliação das mudanças climáticas extremas .....   | 47 |
| Tabela 5-1 pontos centrais de cada clima futuro em cada cenário de emissão. ....  | 53 |
| Tabela 5-2 Simulações que projetam as maiores mudanças climáticas médias na RMBH para o final do século XXI em cada cenário de emissão.....   | 54 |
| Tabela 5-3 Variação percentual dos índices do ETCCDI entre o período histórico e futuro...  | 57 |
| Tabela 5-4 Simulações que projetam as maiores alterações das condições climáticas extremas em cada clima futuro. ....   | 58 |
| Tabela 5-5 Métricas de erro médias da capacidade de representação do clima histórico .....  | 59 |
| Tabela 5-6 Simulações de maior representatividade para a RMBH em cada cenário de emissão. ....  | 60 |
| Tabela 5-7 Porcentagem de estações que projetam incrementos ou diminuições nas intensidades das precipitações máximas diárias associadas a diferentes tempos de retorno no curto prazo. ....  | 80 |
| Tabela 5-8 Frequência de ocorrência das PDMA atuais no futuro de curto prazo, cenário de emissão SSP1-2.6 .....   | 83 |
| Tabela 5-9 Frequência de ocorrência das PDMA atuais no futuro de curto prazo, cenário de emissão SSP5-8.5 .....   | 84 |
| Tabela 5-10 Porcentagem de estações que projetam incrementos ou diminuições nas intensidades das precipitações máximas diárias associadas a diferentes tempos de retorno no médio prazo. .... | 84 |
| Tabela 5-11 Frequência de ocorrência das PDMA atuais no futuro de médio prazo, cenário de emissão SSP1-2.6 .....  | 87 |
| Tabela 5-12 Frequência de ocorrência das PDMA atuais no futuro de médio prazo, cenário de emissão SSP5-8.5 .....  | 87 |
| Tabela 5-13 Porcentagem de estações que projetam incrementos ou diminuições nas intensidades das precipitações máximas diárias associadas a diferentes tempos de retorno no longo prazo. .... | 88 |
| Tabela 5-14 Frequência de ocorrência das PDMA atuais no futuro de longo prazo, cenário de emissão SSP1-2.6 .....  | 91 |
| Tabela 5-15 Frequência de ocorrência das PDMA atuais no futuro de longo prazo, cenário de emissão SSP5-8.5 .....  | 91 |

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

**ACC:** mudanças climáticas antropogênicas

**ANA:** Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

**ANNs:** Redes Neurais artificiais (ANNs)

**AR:** Árvores de regressão

**CMIP:** projeto de comparação de modelos acoplados

**CMIPx:** Fase x do projeto de comparação de modelos acoplados

**DD:** Redução de escala dinâmica

**IAD:** *Downscaling* baseado em inteligência artificial

**ETCCDMI:** *Expert Team for Climate Change Detection Monitoring and Indices*

**FS:** Futuro Climático Frio-Seco

**FU:** Futuro Climático Frio-Úmido

**GEE:** Gases efeito estufa

**GEV:** Generalizada de valores extremos

**IBGE:** Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

**IDF:** curvas de Intensidade Duração e Frequência

**IPCC:** Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas

**KGE:** Kling-Gupta

**MCG:** Modelos de Circulação Geral

**MGGP:** programação genética multi-gen

**NSE:** Nash-Sutcliffe

**PIB:** Produto Interno Bruto

**PG:** programação genética

**PDMA:** Precipitação Diária Máxima por Ano Hidrológico

**QS:** Futuro Climático Quente-Seco

**QU:** Futuro Climático Quente-Úmido

**RCM:** Modelos climático regional

**RMBH:** Região Metropolitana de Belo Horizonte

**RMSE:** raiz do erro quadrático médio

**RVM:** Relevance Vector Machine

**SD:** Downscaling estatístico

**SMV:** Support Vector Machine

# SUMÁRIO

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO</b> .....   | <b>16</b> |
| <b>2</b> | <b>OBJETIVOS</b> .....  | <b>18</b> |
| 2.1      | OBJETIVO GERAL .....  | 18        |
| 2.2      | OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....  | 18        |
| <b>3</b> | <b>REVISÃO DA LITERATURA</b> .....  | <b>19</b> |
| 3.1      | PROJETO DE COMPARAÇÃO DE MODELOS ACOPLADOS (CMIP) .....   | 19        |
| 3.2      | MODELOS DE CIRCULAÇÃO GERAL (MCG).....  | 21        |
| 3.3      | REDUÇÃO DE ESCALA OU DOWNSCALING .....  | 23        |
| 3.3.1    | <i>Método Delta</i> .....   | 24        |
| 3.3.2    | <i>Mapeamento de Quantis -QQ</i> .....  | 24        |
| 3.3.3    | <i>Programação Genética</i> .....   | 25        |
| 3.3.4    | <i>Árvores de regressão</i> .....   | 27        |
| 3.4      | IDENTIFICAÇÃO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS .....   | 27        |
| 3.5      | ALTERAÇÕES DAS CONDIÇÕES PLUVIOMÉTRICAS EM CONTEXTOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS .....   | 28        |
| 3.6      | MÉTRICAS DE EFICIÊNCIA.....   | 31        |
| 3.7      | ANÁLISE DE FREQUÊNCIA LOCAL EM HIDROLOGIA .....   | 32        |
| 3.7.1    | <i>Teste de hipótese de independência</i> .....   | 32        |
| 3.7.2    | <i>Teste de hipótese de Homogeneidade</i> .....   | 33        |
| 3.7.3    | <i>Teste de hipótese de Estacionariedade</i> .....  | 34        |
| 3.7.4    | <i>Distribuição de probabilidade Exponencial</i> .....  | 35        |
| 3.7.5    | <i>Distribuição de probabilidade Gamma</i> .....  | 35        |
| 3.7.6    | <i>Distribuição de probabilidade Gumbel</i> .....   | 36        |
| 3.7.7    | <i>Distribuição de probabilidade Generalizada de valores Extremos (GEV)</i> .....   | 36        |
| 3.7.8    | <i>Distribuição de probabilidade Log-Normal</i> .....   | 36        |
| 3.7.9    | <i>Distribuição de probabilidade Pearson III e Log-Pearson II</i> .....   | 37        |
| <b>4</b> | <b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....  | <b>38</b> |
| 4.1      | ÁREA DE ESTUDO.....   | 39        |
| 4.1.1    | <i>Localização Geográfica, demografia e economia</i> .....  | 39        |
| 4.1.2    | <i>Características climáticas</i> .....   | 40        |
| 4.2      | INFORMAÇÃO PLUVIOMÉTRICA OBSERVADA E PROJETADA .....  | 41        |
| 4.2.1    | <i>Aquisição dos registros pluviométricos históricos da RMBH</i> .....  | 41        |
| 4.2.2    | <i>Obtenção das simulações de temperatura e precipitação históricas e futuras para os cenários de emissão SSP1-2.6 e SSP5-8.5</i> ..... | 44        |
| 4.3      | PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS .....   | 45        |
| 4.3.1    | <i>Identificação e seleção das simulações de maior representatividade para a RMBH em cada cenário de emissão</i> .....                  | 45        |
| 4.3.2    | <i>Identificação das mudanças climáticas médias</i> .....   | 45        |
| 4.3.3    | <i>Identificação das mudanças climáticas extremas</i> .....   | 46        |
| 4.3.4    | <i>Avaliação da capacidade de representação do clima histórico</i> .....  | 49        |
| 4.4      | APLICAÇÃO E AVALIAÇÃO DAS TÉCNICAS DE DOWNSCALING.....  | 49        |
| 4.5      | ANÁLISE DE FREQUÊNCIA DAS PRECIPITAÇÕES DIÁRIAS MÁXIMAS POR ANO HIDROLÓGICO (PDMA) DAS SÉRIES OBSERVADAS E PROJETADAS .....             | 51        |
| 4.6      | IDENTIFICAÇÃO DAS ALTERAÇÕES NA FREQUÊNCIA DE OCORRÊNCIA DAS PRECIPITAÇÕES MÁXIMAS DIÁRIAS .....  | 52        |
| <b>5</b> | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....   | <b>53</b> |
| 5.1      | IDENTIFICAÇÃO E SELEÇÃO DAS SIMULAÇÕES DE MAIOR REPRESENTATIVIDADE PARA A RMBH EM CADA CENÁRIO DE EMISSÃO .....                         | 53        |
| 5.1.1    | <i>Identificação das mudanças climáticas médias</i> .....   | 53        |
| 5.1.2    | <i>Identificação das mudanças climáticas extremas</i> .....   | 56        |
| 5.1.3    | <i>Avaliação da capacidade de representação do clima histórico</i> .....  | 59        |
| 5.2      | APLICAÇÃO E AVALIAÇÃO DAS TÉCNICAS DE DOWNSCALING.....  | 60        |
| 5.2.1    | <i>Downscaling do período histórico 1970-2014</i> .....   | 61        |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 5.2.2    | <i>Downscaling do período Futuro 2015-2100</i> .....   | 76         |
| 5.3      | ANÁLISE DE FREQUÊNCIA DAS PDMA OBSERVADAS E SIMULADAS.....   | 76         |
| 5.3.1    | <i>Análise de frequência do período histórico</i> .....  | 76         |
| 5.3.2    | <i>Análise de frequência do período Futuro</i> .....   | 77         |
| 5.4      | IDENTIFICAÇÃO DAS ALTERAÇÕES NA FREQUÊNCIA DE OCORRÊNCIA DAS PRECIPITAÇÕES MÁXIMAS<br>DIÁRIAS..... | 79         |
| 5.4.1    | <i>Futuro Climático Quente Úmido</i> .....   | 92         |
| 5.4.2    | <i>Futuro Climático Quente Seco</i> .....  | 95         |
| 5.4.3    | <i>Futuro Climático Frio Úmido</i> .....   | 98         |
| 5.4.4    | <i>Futuro Climático Frio Seco</i> .....  | 100        |
| <b>6</b> | <b>CONCLUSÕES</b> .....  | <b>103</b> |
| <b>7</b> | <b>RECOMENDAÇÕES</b> .....   | <b>106</b> |
|          | <b>APÊNDICE 1: COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO DAS ESTAÇÕES EMPREGADAS COMO<br/>APOIOS</b> .....        | <b>113</b> |
|          | <b>APÊNDICE 1.1: ESTAÇÕES EMPREGADAS COMO APOIOS</b> .....   | <b>115</b> |
|          | <b>APÊNDICE 2: CURVAS DE DUPLA MASSA</b> .....   | <b>117</b> |
|          | <b>APÊNDICE 3: SIMULAÇÕES EMPREGADAS EM CADA CENÁRIO DE EMISSÃO</b> .....                          | <b>133</b> |
|          | <b>APÊNDICE 4: AVALIAÇÃO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS EXTREMAS</b> .....                                | <b>137</b> |
|          | <b>APÊNDICE 5: MÉTRICAS DE ERRO DA ANÁLISE DE FREQUÊNCIA POR ESTAÇÃO</b> .....                     | <b>139</b> |
|          | <b>APÊNDICE 5: ANÁLISE DE FREQUÊNCIA HISTÓRICA</b> .....   | <b>144</b> |
|          | <b>APÊNDICE 6: FREQUENCIAS DE OCORRÊNCIA HISTÓRICAS E PROJETADAS</b> .....                         | <b>145</b> |

# 1 INTRODUÇÃO

O conhecimento dos padrões de chuva é extremamente importante para o gerenciamento e administração dos recursos hídricos, visto que uma apropriada caracterização do regime pluviométrico permite uma adequada gestão e projeção de sistemas e estruturas hidráulicas, como redes de drenagem pluvial, pontes, bueiros, sarjetas e canais.

Historicamente, as curvas de Intensidade Duração e Frequência (IDF) têm sido empregadas como uma das principais ferramentas no conhecimento e caracterização das precipitações máximas, porém, em um contexto de mudança climática, autores como Shahabul Alam *et al.* (2015), ressaltam a necessidade de desenvolver estudos que identifiquem alterações na frequência de ocorrência das precipitações máximas, visto que como é indicado por Hassanzadeh *et al.* (2014) e Liu *et al.* (2020), as mudanças podem modificar os padrões de temperatura e umidade relativa, conduzindo assim, à intensificação dos eventos meteorológicos extremos (ROCA; BELTRÁN; GÓMEZ, 2019).

Neste contexto, o projeto de intercomparação de Modelos acoplados (CMIP) tenta entender melhor as mudanças climáticas passadas, presentes e futuras, que surgem da variabilidade natural ou como respostas às alterações no forçamento radiativo. Atualmente, o CMIP se encontra na sexta etapa de desenvolvimento (CMIP6), e contempla a simulação climática de diferentes cenários de emissão para o final do século XXI. Estes cenários são o resultado da combinação de diferentes forçamentos radiativos com as trajetórias de desenvolvimento socioeconômico que podem ser adotadas pela humanidade ao longo do século XXI.

Diante do exposto, têm surgido diversas pesquisas que procuraram identificar e quantificar possíveis alterações nas frequências de ocorrência das precipitações máximas, sob contextos de mudanças climáticas, como é o caso dos estudos desenvolvidos por Hassanzadeh *et al.* (2014), Shahabul Alam *et al.* (2015), Sung *et al.* (2018) e Weschenfelder *et al.* (2019). A maior parte dos estudos relacionados com esta temática são desenvolvidos a partir dos resultados fornecidos pelos Modelos de Circulação Geral (MCG), pois como é indicado pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas-IPCC, estes constituem a ferramenta disponível mais avançada para a simulação do sistema climático global no contexto de

mudanças climáticas, graças a sua capacidade de gerar estimativas coerentes do clima tanto no âmbito físico como geográfico.

Visto que os MCG são incapazes de representar adequadamente as características hidroclimáticas locais de pequenas áreas como bacias e sub-bacias hidrográficas, a aplicação de técnicas de redução de escala, o *Downscaling*, se tornou um procedimento padrão neste tipo de estudos (OLSSON *et al.*, 2016; WORKU *et al.*, 2021).

O objetivo das técnicas de redução de escala é captar as informações obtidas com MCGs para escalas locais e/ou regionais. Para tanto, são investigadas as relações existentes entre as variáveis hidroclimatológicas observadas *in situ* e as simuladas pelos MCGs para o período histórico. Permitindo a obtenção de séries hidroclimatológicas futuras em escalas locais, a partir da aplicação das relações definidas no período histórico.

Neste contexto, e diante desse cenário de especulações e incertezas quanto aos impactos causados pelas eventuais mudanças climáticas, o presente trabalho procura estimar as possíveis alterações nas frequências de ocorrência das precipitações diárias máximas por ano hidrológico na região metropolitana de Belo Horizonte (RMBH), que se apresentariam sob a ocorrência dos cenários de emissão SSP5-8.5 e SSP1-2.6 do CMIP6, contribuindo desta forma na descrição, caracterização e entendimento das alterações pluviométricas que poderiam apresentar-se na RMBH na escala diária, diante o contexto de mudanças climáticas que são projetadas para o futuro, providenciando desta forma para os atores envolvidos na gestão e gerenciamento dos recursos hídricos na RMBH, um panorama geral das eventuais condições pluviométricas futuras.

Desta forma, no segundo capítulo são apresentados os objetivos, no terceiro são apresentados os cenários de emissão contemplados, as características dos MCG, as principais técnicas de redução de escala aplicadas, as metodologias empregadas na identificação das mudanças climáticas, alguns dos principais estudos desenvolvidos na área e os procedimentos implementados no desenvolvimento da análise de frequência. Já no quarto capítulo é descrita de forma detalhada a metodologia empregada, no quinto são apresentados e discutidos os resultados, no sexto são relatadas as conclusões e finalmente no sétimo são expostas as recomendações.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 *Objetivo geral*

O objetivo geral desta pesquisa é a avaliação das possíveis alterações nas frequências das precipitações diárias máximas por ano hidrológico, que se apresentariam na Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH) sob a ocorrência dos cenários de emissão SSP1-2.6 e SSP5-8.5 do CMIP6.

### 2.2 *Objetivos específicos*

- Identificar as simulações climáticas que projetam as maiores alterações das condições climáticas médias e extremas na RMBH nos cenários de emissões futuros SSP1-2.6 e SSP5,8,5 do CMIP6;
- Identificar a melhor técnica de *Downscaling* para a RMBH, dentre o Mapeamento de Quantis, a Programação Genética, as Árvores de Regressão e o Método Delta;
- Desenvolver a análise de frequência das séries de precipitação diária máxima por ano hidrológico observadas e simuladas pelos MCGs no período histórico, para os cenários SSP1-2.6 e SSP5-8.5;
- Avaliar as alterações nas frequências de ocorrência das precipitações diárias máximas por ano hidrológico, estimadas a partir das séries simuladas pelos MCG, em relação aos resultados alcançados com as séries históricas.

### 3 REVISÃO DA LITERATURA

#### 3.1 Projeto de comparação de modelos acoplados (CMIP)

O projeto de comparação de modelos acoplados surge em 1995, com o propósito de disponibilizar à comunidade científica os resultados das condições climáticas simuladas com os modelos de circulação geral, em condições de contorno padronizadas (LLNL, 2020).

As condições de contorno são estabelecidas a partir da projeção de cenários de emissão de gases efeito estufa (GEE), assim por exemplo, na terceira fase do CMIP (CMIP3) foram contemplados seis cenários de emissões: A1F1, A1B, A1T, B1, A1 e B2. Cada um destes cenários levou em consideração as dinâmicas de desenvolvimento populacional e econômico que poderia seguir a humanidade até o final do século XXI (ACEVEDO, 2009).

Os cenários de emissão são atualizados conforme se avança nas etapas do CMIP, assim por exemplo, na quinta fase foram projetados quatro cenários de emissão: RCP-2,6, RCP-4,5, RCP-6,0 e RCP-8,5. No caso do CMIP5, os cenários projetados se encontram associados ao incremento do forçamento radiativo esperado para o 2100, tomando como referência as condições pré-industriais. Deste modo, o RCP-4,5 e RCP-8,5 estimam forçamentos radiativos de 4,5 e 8,5 W m<sup>-2</sup> para o final do século XXI (TAYLOR; STOUFFER; MEEHL, 2009).

Na etapa mais recente do projeto de comparação de modelos acoplados (CMIP6), os oito cenários de emissão projetados levam em consideração o desenvolvimento socioeconômico e os forçamentos radiativos que poderiam ser alcançados no final do século XXI. A seguir na Tabela 3-1, são apresentadas as características dos cenários de emissão contemplados no CMIP6.

**Tabela 3-1 Cenários de emissão contemplados no CMIP6**

| Cenário de emissão | Descrição  |
|--------------------|--|
| SSP5-8.5           | Este cenário prevê que, o desenvolvimento econômico e social da humanidade até o final do século XXI estará regido por: i) Uma elevada exploração de recursos; ii) Um uso intensivo de combustíveis fósseis; iii) Uma alta demanda de energia a nível global.<br><br>Todos esses fatores levam a elevadas concentrações de gases efeito estufa, que conduzem a alcançar um forçamento radiativo de 8,5 W m <sup>-2</sup> no final do século XXI. |
| SSP5-3.4-OS        | Neste cenário, é considerado que as emissões de GEE são iguais às do cenário SSP5-8.5 até 2040, porém, entre o 2040 e 2070 se produz uma mitigação agressiva que leva a uma emissão nula de GEE em 2070 (O'NEILL <i>et al.</i> , 2016).  |

**Continuação da Tabela 3-2 Cenários de emissão contemplados no CMIP6**

| Cenário de emissão         | Descrição  |
|----------------------------|--|
| <b>SSP4-6.0 e SSP4-3.4</b> | Nestes cenários é previsto: i). Uma alta desigualdade entre nações; ii) Um alto desenvolvimento tecnológico das grandes economias, iii) Um uso energético diversificado entre fontes ricas em carbono e energias limpas.<br><br>Todos esses fatores foram combinados com forçamentos radiativos de 6,0, e 3,4 W m <sup>-2</sup> .  |
| <b>SSP3-7.0</b>            | Este cenário prevê: i).Um incremento das desigualdades sociais com o percurso do tempo; ii) Um lento desenvolvimento econômico das nações; iii) A priorização do desenvolvimento econômico local e regional sobre o desenvolvimento global.<br><br>Esses fatores foram combinados com um forçamento radiativo de 7,0 W m <sup>-2</sup> .   |
| <b>SSP2-4.5</b>            | Neste cenário é considerado que: i). As tendências sociais, econômicas e tecnológicas não mudam significativamente dos padrões históricos; ii) As instituições globais e nacionais têm progressos lentos no alcance das metas de desenvolvimento sustentável.<br><br>Esses fatores foram combinados com um forçamento radiativo de 4,5 W m <sup>-2</sup> .   |
| <b>SSP1-1.9 e SSP1-2.6</b> | Nestes cenários é considerado que: i) O mundo vira em direção à sustentabilidade; ii) Existe um compromisso das nações em reduzir as desigualdades sociais; iii) O consumo é orientado a um baixo crescimento material e um baixo consumo de recursos e energias.<br><br>Todos esses fatores foram combinados com forçamentos radiativos de 1,9 e 2,6 W m <sup>-2</sup> . Sendo o cenário SSP1-1,9 o que projeta as menores mudanças climáticas para final do século XXI, seguido do cenário SSP1-2.6. |

Fonte: adaptado de Riahi *et al.*, (2016).

Na Tabela 3-3, são apresentadas as condições de temperatura projetadas para o final do século XXI em cada cenário de emissão.

**Tabela 3-3 Condições climáticas de temperatura média anual projetadas para o 2100 em cada um dos cenários de emissão.**

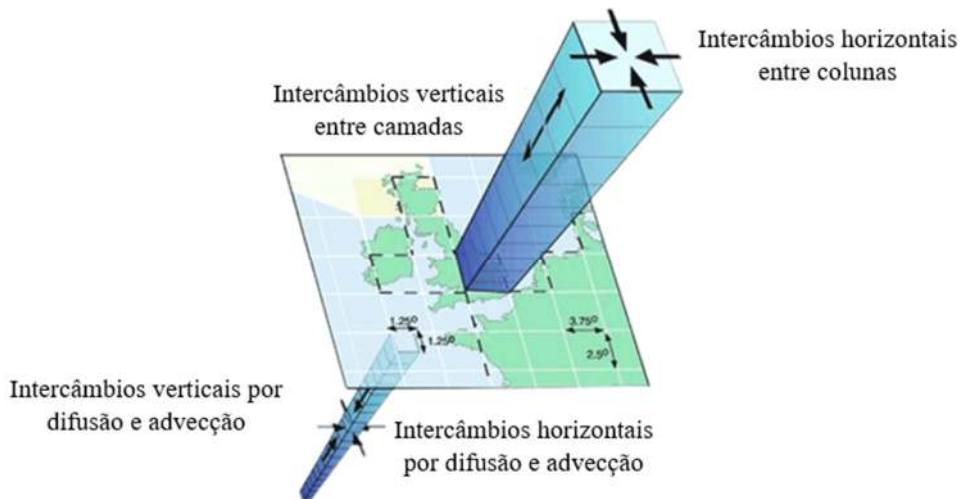
| Cenário de emissão | Incremento estimado da temperatura no 2100.<br>[°C] |
|--------------------|---|
| SSP1-1.9           | 1,38  |
| SSP1-2.6           | 1,76  |
| SSP4-3.4           | 2,19  |
| SSP5-3.4OS         | 2,29  |
| SSP2-4.5           | 2,63  |
| SSP4-6.0           | 3,22  |
| SSP3-7.0           | 4   |
| SSP5-8.5           | 5   |

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

### 3.2 Modelos de Circulação Geral (MCG)

Os modelos de circulação geral são as representações matemáticas disponíveis mais avançadas de interpretação dos processos atmosféricos, oceânicos e criosféricos (IPCC, 2020). Se encontram constituídos por quadrículas tridimensionais de resolução variável, na escala horizontal, as retículas oscilam entre os 50 e 600 km, enquanto a variação vertical se encontra entre 10 e 30 camadas (ver Figura 3-1).

**Figura 3-1 Discretização espacial dos modelos de circulação Geral**



Fonte: Traduzido do IPCC (2020)

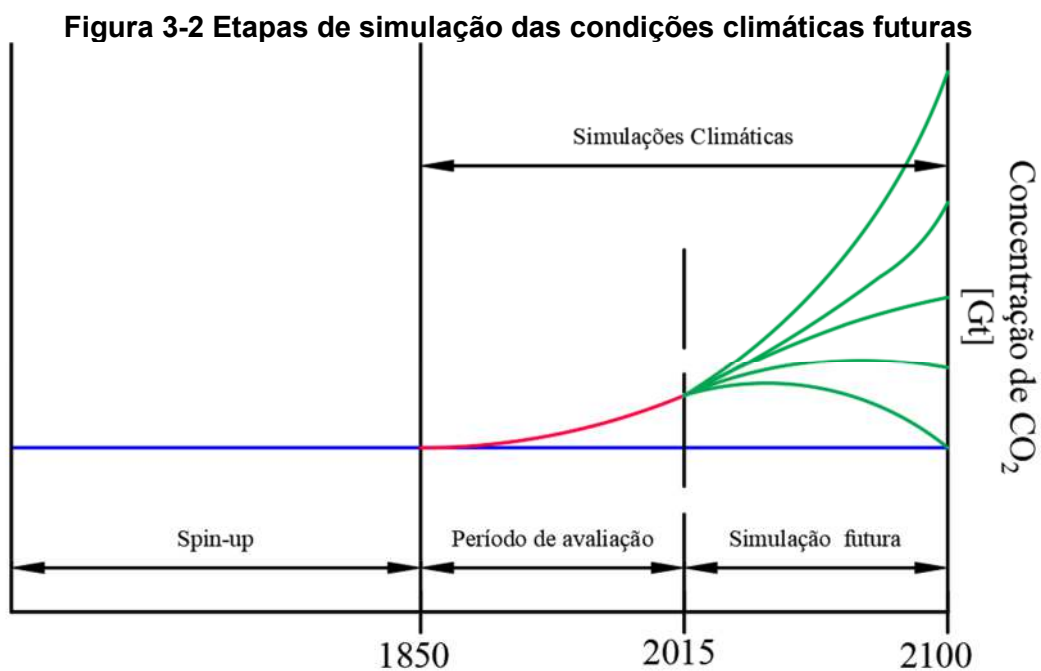
A representação matemática empregada pelos MCGs leva em consideração os intercâmbios de energia e umidade existente entre a atmosfera, os oceanos e a área continental. Desta forma, são empregados e gerados uma diversidade de dados associados a: temperatura, precipitação, umidade relativa do ar, velocidade do vento, pressão atmosférica, localização das nuvens e forçamentos radiativos.

A física dos MCGs inclui a representação da reflexão e absorção da radiação tanto a nível atmosférico como a nível continental, a variação sazonal das condições climáticas, os processos de circulação oceânica e a absorção e emissão de gases efeito estufa (GEE). Ainda que os MCGs consigam representar e simular adequadamente a maioria dos processos climatológicos e atmosféricos de grande escala, existe uma limitação na representação dos processos que ocorrem em pequenas escalas, como é caso de tempestades elétricas, processos de convecção, turbulências próximas à superfície terrestre, desenvolvimento de nuvens e flocos de neve. Ante a dificuldade de representação destes processos, os modelos empregam parametrizações, que

são um conjunto de simplificações físicas que facilitam a estimativa dos intercâmbios de calor e energia em processos que ocorrem em menores escalas.

Os MCG são empregados entre outras coisas, com o propósito de obter uma descrição das condições climáticas médias que poderiam se apresentar ante a ocorrência de determinadas condições atmosféricas, como é o caso do incremento da concentração de GEE, para o qual, é gerada uma perturbação das condições atmosféricas, que conduzem a alterações dos forçamentos radiativos e das condições climáticas. É importante ressaltar que os resultados dos MCGs não devem ser empregados como ferramenta de predição de eventos pontuais, porque não é este seu objetivo, o propósito dos MCGs é facilitar a identificação de tendências estatísticas de longo prazo nas séries climáticas.

Como é indicado por Castro (2007), as condições climáticas são simuladas em três etapas: i) Spin-up; ii) Período de avaliação; iii). Simulação futura. De acordo com Ambrizzi *et al.*, (2019), o Spin-up é o tempo de simulação necessário para que o modelo ajuste as variáveis hidrometeorológicas. Por outra parte, no período de avaliação tenta-se reproduzir as condições climáticas históricas, no caso do CMIP6 é considerado o intervalo temporal 1850-2014. Finalmente, é na etapa de simulação futura que são reproduzidas as condições climáticas a ocorrer em cada cenário de emissão (Ver Figura 3-2).



Fonte: Adaptado de Castro (2007)

As simulações geradas pelos MCG não conseguem reproduzir as condições climáticas nas escalas locais ou regionais, devido a sua baixa resolução espacial (AMBRIZZI *et al.*, 2019; COULIBALY, 2004). Neste contexto, tem surgido algumas técnicas para incrementar a resolução espacial das saídas dos MCG, conhecidas como técnicas de redução de escala ou *Downscaling* (COULIBALY, 2004).

Devido à baixa resolução espacial dos MCG, é comum que os estudos e pesquisas que visam identificar alterações dos padrões climáticos: i) empreguem as simulações dos Modelos Climáticos Regionais (RCM); ii) Apliquem técnicas de redução de escala aos resultados dos MCG.

### **3.3 Redução de escala ou Downscaling**

O objetivo da redução de escala é estabelecer relações entre as saídas geradas pelos MCG e as condições climáticas locais ou regionais. Na literatura, têm sido propostas diversas técnicas de redução de escala (XU, 1999). Contudo, os principais enfoques empregados são: i) Técnicas estatísticas de *Downscaling* (SD); ii) Geradores estocásticos de Clima; iii) Técnicas de redução de escala Dinâmicas ou *Dynamical Downscaling* (DD); iv) Técnicas de redução de escala baseadas em inteligência artificial (IAD): Redes Neurais artificiais (ANNs), programação genética (PG), Support Vector Machine (SMV) e Relevance Vector Machine (RVM).

No caso do SD e IAD, as relações são estabelecidas a partir das condições climáticas observadas e simuladas pelos MCGs. No SD os nexos entre os padrões globais e regionais são estabelecidos empregando estatística, enquanto no IAD, são os algoritmos de inteligência artificial os que determinam as relações. De outra parte, como é indicado por Xu *et al.* (2019), no DD os RCM são os responsáveis em determinar as relações entre as condições climáticas globais e regionais.

A eficiência das técnicas de redução de escala tem sido estudada por diversos autores, no caso da precipitação e temperatura são ressaltados os estudos desenvolvidos por: Coubaly (2004), Hashmi *et al.* (2011), Li *et al.* (2010), Sachindra *et al.*, (2014), Sachindra *et al.*, (2018a), Sachindra *et al.*, (2018b), Salehnia *et al.*, (2019) e Wang *et al.*, (2016).

Salehnia *et al.*, (2019), identificaram que o DD fornece melhores resultados do que o SD na redução de escala da precipitação total anual e sazonal, porém, ressaltam que o SD é computacionalmente mais simples do que o DD, de outra parte, Coubaly (2004) identificou

que as técnicas de redução de escala da temperatura baseadas em PG fornecem melhores resultados do que as técnicas estatísticas, por sua parte, Hashmi *et al.* (2011) identificaram que na redução de escala da precipitação diária, as técnicas baseadas em PG fornecem melhores resultados do que as técnicas baseadas em ANNs, em contrapartida, Sachindra *et al.*, (2018b) recomendaram para a redução de escala da precipitação mensal, o uso de técnicas baseadas em RVM sobre técnicas baseadas em PG, ANNs e SVM.

Diante o exposto, é possível perceber que não há um consenso sobre a aplicação das técnicas de *Downscaling*, e que como é indicado por Nover *et al.* (2016), é imprescindível avaliar diversas técnicas e enfoques. A seguir, são apresentadas as técnicas de *Downscaling* contempladas no desenvolvimento do presente estudo.

### 3.3.1 Método Delta

O método Delta é uma técnica de redução de escala estatística, que se aplica empregando as relações existentes entre as variáveis climáticas locais observadas e simuladas. O método tem sido empregado em diversas pesquisas devido a sua simplicidade e fácil implementação (p. ex. Golkar Hamzee *et al.*, (2019); Salehnia *et al.*, (2019), Salehnia *et al.*, (2020); Ullah *et al.*, (2018)). A seguir é apresentado o equacionamento matemático empregado pelo método Delta:

$$P_{SD}^{Delta} = P_{Mod,diaria} * \left( \frac{\bar{P}_{Obs}}{\bar{P}_{Mod}} \right)_{Mensal} \quad [1]$$

Sendo:  $P_{SD}^{Delta}$  a precipitação com *Downscaling*,  $P_{Mod}$  a precipitação simulada pelo GCM na escala diária,  $\bar{P}_{Obs}$  a precipitação média da estação pluviométrica,  $\bar{P}_{Mod}$  a precipitação média simulada no período histórico.

### 3.3.2 Mapeamento de Quantis -QQ

O mapeamento de Quantis (QQ) é uma técnica de redução de escala estatística aplicada a partir das distribuições de probabilidades empíricas observadas e simuladas. Seu desenvolvimento é um pouco mais complexo que o método Delta, porém, em termos gerais é de fácil implementação. Devido a sua baixa complexidade, tem sido empregada nos seguintes estudos: Cannon *et al.*, (2015), Enayati *et al.*, (2021) e Heo *et al.*, (2019) . A seguir, é descrito o equacionamento matemático do método:

$$P_{SD}^{QQ} = F_o^{-1}[F_M(P_M)] \quad [2]$$

Sendo  $P_{SD}^{QQ}$  a precipitação com *Downscaling*,  $F_o^{-1}$  inversa da função de probabilidade empírica das precipitações do período histórico,  $F_M$  função de probabilidade empírica das precipitações simuladas,  $P_M$  precipitação simulada pelos MCG.

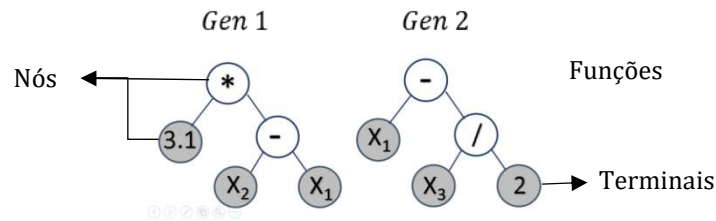
### 3.3.3 Programação Genética

Com o propósito de fornecer solução a uma ampla gama de problemas a partir de processos de aprendizado de máquina, foi desenvolvida por Koza (1992) a programação genética (PG), a qual se encontra inspirada na seleção natural de Darwin. A execução da PG contempla a geração aleatória de um conjunto de programas que evoluem com o passo das gerações, desta forma, em cada geração é avaliada a capacidade dos programas de resolver o problema em questão. Os programas que apresentam as maiores capacidades de solução do problema em cada geração evoluem e avançam à seguinte geração.

Como é indicado por Mehr *et al.* (2018), os programas se encontram representados por genes em forma de árvore, os quais contém nós e ramos, cada nó pode conter um terminal ou função (p.ex. +, -, x, /, sin, cos, e, ln, entre outras). As funções incluem operadores booleanos, matemáticas ou aritméticas, enquanto os terminais estão constituídos por variáveis ou constantes numéricas.

Com o propósito de melhorar a capacidade de resolução dos problemas têm surgido algumas variantes da PG, dentro da qual se encontra a programação genética multi-gen (MGGP), a qual, se caracteriza por combinar árvores de pouca profundidade. A MGGP foi desenvolvida com o propósito de obter uma expressão matemática que descreva a solução do problema em questão, mediante a utilização da regressão simbólica (HINCHLIFFE *et al.*, 1996). O presente trabalho foi desenvolvido a partir da MGGP, não obstante, por motivos práticos, o presente trabalho se refere a ela como PG. A seguir na Figura 3-3, é apresentada a estrutura básica das expressões matemáticas geradas pela PG.

**Figura 3-3 Representação dos programas na PG**



$$y = d_0 + d_1 [3.1 * (x_2 - x_1)] + d_2 [x_1 - x_3/2]$$

sendo:  $y$  a Predição,  $x_1$ ,  $x_2$  e  $x_3$  as variáveis predictoras,  $d_1$  e  $d_2$  as ponderações dos genes 1 e 2 e  $d_0$  o termo irregular. As ponderações dos genes são os coeficientes de regressão, os quais geralmente são determinados a partir do método de mínimos quadrados.

A redução de escala baseada em PG, procura captar as relações existentes entre as variáveis climatológicas observadas e simuladas, retornando assim, a expressão matemática que as descreve. É comum que as técnicas de redução de escala baseadas em inteligência artificial empreguem mais de uma variável predictor, isto é, podem ser empregadas as simulações de temperatura, precipitação, e pressão atmosférica, na predição da precipitação observada em alguma estação pluviométrica.

A seleção das variáveis predictoras é uma tarefa extremamente importante e complexa, visto que sua adequada eleição garante uma apropriada predição. Neste contexto, a PG poderia se considerar uma abordagem vantajosa, visto que, além de selecionar os preditores mais influentes, retorna as expressões matemáticas que descrevem as relações entre as variáveis predictoras e as variáveis a serem preditas. Neste cenário, a PG tem sido empregada amplamente nos processos de *Downscaling* das pesquisas (p. ex. Coulibaly (2004), Hashmi *et al.*, (2011), Hassanzadeh *et al.*, (2014), Sachindra *et al.*, (2018a), Sachindra *et al.*, (2018b), Salehnia *et al.*, (2019)).

As incertezas da redução de escala se incrementam conforme o número de preditores aumentam, visto que, como é indicado por Fadhel *et al.*, (2017) os MCG são os principais contribuidores de incertezas. Nesse contexto, quanto menor for o número de variáveis predictoras, menores serão as incertezas associadas a este processo.

### 3.3.4 Árvores de regressão

As árvores de regressão (AR) são técnicas de aprendizado de máquinas empregadas na geração de modelos de previsão. Estes são obtidos a partir da partição recursiva do espaço amostral e do ajuste de modelos preditivos a cada subdivisão (LOH, 2011).

Deste modo, o objetivo geral da técnica é dividir o espaço amostral em  $k$  unidades e ajustar um modelo preditivo a cada subespaço, de tal modo que a predição da variável de interesse  $Y$ , consiga ser realizada por meio de uma função por partes do tipo:

$$Y = \begin{cases} f_{E_0}(x), & x \in E_0 \\ f_{E_1}(x), & x \in E_1 \\ \dots & \dots \\ f_{E_k}(x), & x \in E_k \end{cases} \quad [3]$$

Sendo:  $Y$  a variável predita,  $f_{E_i}(x)$  o modelo preditivo do subespaço amostral  $E_i$ .

A execução do *Downscaling* a partir de árvores de regressão requer a utilização de dados observados e simulados, como é o caso de registros de temperatura, pressão atmosférica, precipitação entre outros. O desenvolvimento de processos de *Downscaling* a partir de árvores de regressão tem sido empregado diversos estudos, como é o caso dos desenvolvidos por: Khalid e Sitanggang (2022) , Hutengs e Vohland (2016), Im *et al.*, (2016) e Pouteau *et al.*, (2011).

Na redução de escala por meio da AR, deve ser empregado a menor quantidade de preditores, visto que as incertezas da redução de escala se incrementam conforme o número de preditores aumentam.

### 3.4 Identificação das mudanças climáticas

Como é apresentado por Díaz *et al.*, (2020), Li *et al.*, (2021) e Lutz *et al.*, (2016), a verificação e quantificação das mudanças na temperatura e precipitação em contextos de mudanças climáticas pode ser realizada a través da estimativa do conjunto de índices propostos pelo “*Expert Team for Climate Change Detection Monitoring and Indices* (ETCCDI, 2020)”. A utilização deste conjunto de índices permite obter uma perspectiva das mudanças observadas e/ou projetadas nos eventos meteorológicos extremos. Os índices descrevem características

particulares dos eventos extremos, dentre os quais se ressaltam sua amplitude e persistência. O conjunto básico inclui um total de 27 índices que se encontram detalhados pelo ETCCDI em: [http://etccdi.pacificclimate.org/list\\_27\\_indices.shtml](http://etccdi.pacificclimate.org/list_27_indices.shtml).

### **3.5 Alterações das condições pluviométricas em contextos de mudanças climáticas**

A caracterização da frequência dos eventos extremos é desenvolvida geralmente sob enfoques estacionários (CARVAJAL-SERNA; GRAJALES-CARDONA, 2019). Contudo, segundo Acevedo (2009), a hipótese de estacionariedade colapsa ante as mudanças climáticas. Deste modo, autores como Milly *et al.* (2008) afirmam que a estacionariedade está morta, como consequência das mudanças climáticas antropogênicas (ACC), as quais têm gerado alterações substanciais nas precipitações médias e extremas, nas taxas de evapotranspiração e nas taxas de escoamento dos rios (IPCC, 2007). De outra parte, Montanari e Koutsoyiannis (2014), afirmam que para desenvolver uma modelagem de processos ambientais sob enfoques não estacionários, é imprescindível estabelecer as relações determinísticas que descrevem as alterações temporais dos parâmetros estatísticos das séries, caso isto não ocorra, as projeções geradas pelos modelos não estacionários podem ser menos representativas que as projeções geradas pelos modelos estacionários. Da mesma forma, Montanari e Koutsoyiannis (2014), enfatizam que a estacionariedade não está morta, pois afirmar isto implicaria que o desenvolvimento de modelagens sob este enfoque é inútil, e a experiência demonstra que está técnica ainda é vantajosa.

Ainda que a ciência sugira a existência de um sinal significativo e crescente das ACC, não existe evidência que esta seja distinguível da variabilidade natural do sistema climático, no entanto, é impossível desconsiderar seus efeitos no planejamento e projeção da infraestrutura hidráulica (MILLY *et al.*, 2015).

Neste contexto, autores como Milly *et al.* (2015), indicam que é o momento oportuno para atualizar as estratégias analíticas de gestão dos recursos hídricos em contextos de mudanças climáticas, a partir de enfoques que incluam os métodos estocásticos e as ciências determinísticas baseadas em processos. Da mesma forma, Bayazit (2015), ressalta que num mundo mutante, as decisões associadas à gestão dos recursos hídricos requerem previsões hidrológicas de longo prazo, que levem em consideração as eventuais mudanças das

propriedades estatísticas das séries hidrológicas, para o qual, recomenda empregar as simulações geradas pelos MCG.

Neste contexto de mudança climática, tem-se observado um incremento das intensidades da precipitação, tanto no nível diário como subdiário em diferentes partes do mundo (MAMOON *et al.*, 2016; RODRÍGUEZ *et al.*, 2014). Para o final do século XXI, é prevista uma diminuição substancial do período de retorno da precipitação máxima anual (IPCC, 2014), que levaria a incrementos dos eventos extremos de precipitação e à alteração das relações intensidade duração e frequência (ARNBJERG-NIELSEN, 2012; MAMOON *et al.*, 2016; RODRÍGUEZ *et al.*, 2014; WATERS *et al.*, 2003).

Assim, autores como Fadhel *et al.* (2017), Shahabul *et al.* (2015) e Waters *et al.* (2003), ressaltam a necessidade de desenvolver pesquisas que identifiquem possíveis alterações nas relações intensidade duração e frequência sob contextos de mudança climática, diante o qual, têm surgido diversas pesquisas.

Por exemplo, Acevedo (2009) desenvolveu um estudo para a Colômbia a partir de quatro MCG do CMIP3. Os resultados mostram que, no contexto de mudança climática, é plausível que se apresente um incremento da frequência de ocorrência das precipitações máximas diárias em algumas partes do território colombiano, enquanto em outras, pode se apresentar uma diminuição das intensidades.

Mirhosseini, Srivastava e Stefanova (2013), desenvolveram um estudo para o estado do Alabama nos Estados Unidos, no qual foi empregada uma combinação de seis modelos climáticos globais e regionais. Os resultados sugerem que os padrões futuros de precipitação poderiam sofrer alterações que estariam caracterizadas pela diminuição das intensidades das precipitações de curta duração (i.e. <4h).

Rodríguez *et al.* (2014) realizaram um estudo na cidade de Barcelona a partir das simulações de cinco MCG, dos quais, quatro faziam parte do CMIP3 e um do CMIP2. Os resultados mostraram que, para o último terço do século XXI, é possível que as precipitações diárias associadas a tempos de retornos superiores a 20 anos, apresentem um incremento do 4%, enquanto que o aumento projetado para as precipitações subdiárias seria maior.

Shahabul *et al.* (2015) desenvolveram um estudo para a cidade de Saskatoon, no Canadá, o qual foi elaborado a partir de oito MCG disponíveis no CMIP5. Os resultados permitiram identificar que durante o percurso do século XXI, é plausível que se incrementem entre o 12 e 18% as intensidades das precipitações associadas com os tempos de retorno de 100 e 25 anos respectivamente.

Fadhel *et al.* (2017) desenvolveram um estudo no condado de West Yorkshire, na Inglaterra, que visou em identificar as possíveis alterações das curvas IDF no futuro. O estudo foi desenvolvido a partir das simulações de um RCM. Os resultados indicam que: i) as variações e incertezas das curvas IDF para o clima futuro dependem do período de referência adotado para a correção do viés do RCM; ii). É provável que no futuro se apresentem incrementos tanto na frequência de ocorrência, quanto nas intensidades das precipitações máximas, não obstante, os incrementos variam conforme o período de referência adotado para a correção do viés.

Weschenfelder *et al.* (2019) desenvolveram um estudo para a cidade de Porto Alegre, no Brasil, que visou entre outras coisas, avaliar o impacto das alterações climáticas sobre as curvas IDF, para o qual, foi empregado o gerador estocástico LARS-WG, a partir do qual foram geradas séries sintéticas de precipitação diária baseadas em três cenários de emissões do CMIP3. Os resultados prevêem incrementos nas precipitações para os períodos 2046-2065 e 2080-2090, tendo sido recomendada a utilização da curva IDF atual da cidade de Porto Alegre com uma majoração de 10 a 20% para o período 2046-2065.

Nunes (2018) desenvolveu um estudo na Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH), que visou entre outros objetivos, identificar e quantificar tendências na ocorrência de eventos extremos de precipitação, para o qual, foi desenvolvida uma análise de tendência dos registros diários e subdiários de precipitação e temperatura, a partir do estudo das tendências nos índices de precipitação e temperatura recomendados pelo ETCCDMI. Os resultados detectaram tendências nas precipitações com durações de até 1 hora na estação pluviográfica de Belo Horizonte (83587), as tendências observadas apontam para um incremento da intensidade desses eventos, assim mesmo, foram identificadas tendências positivas para as temperaturas médias e mínimas anuais das estações climatológicas de Belo Horizonte e Florestal.

De outra parte, O painel Brasileiro de mudanças climáticas-GT2 (2013) informa que nas metrópoles da região sudeste do Brasil, tem-se detectado um incremento dos eventos extremos

associados a enchentes e inundações, o qual, apresenta relação com os resultados encontrados por Nunes (2018).

Neste contexto, e visto que a maioria de estudos expostos anteriormente identificaram alterações nos padrões de chuva, caracterizados pelo incremento das intensidades das precipitações, e em alguns casos pela diminuição dos períodos de retorno, é importante desenvolver estudos que permitam estimar e quantificar as possíveis alterações nas frequências de ocorrência de eventos extremos de precipitação na RMBH, visto que, seu conhecimento permitirá uma adequada gestão dos recursos hídricos e tomada de decisões em contextos de mudanças climáticas.

### 3.6 Métricas de Eficiência

A eficiência das simulações hidrológicas pode ser verificada por meio da estimativa de métricas de erro, sendo os coeficientes de Nash-Sutcliffe (NSE), Kling-Gupta (KGE) e a raiz do erro quadrático médio (RMSE) algumas das mais empregadas.

Nash-Sutcliffe (1979) e Gupta *et al.*, (2009), apontam que valores de NSE e KGE iguais a 1 indicam um ajuste perfeito entre os valores observados e simulados, enquanto que, no caso do RMSE é representado com um valor 0. A seguir, são apresentadas as equações empregadas na estimativa do NSE, KGE e RMSE.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X'_i)^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_i)^2} \quad [4]$$

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + \left(\frac{\sigma'_i}{\sigma_i} - 1\right)^2 + \left(\frac{\bar{X}'_i}{\bar{X}_i} - 1\right)^2} \quad [5]$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X'_i)^2}{n}} \quad [6]$$

Sendo  $X_i$  o valor observado,  $X'_i$  o valor simulado,  $\bar{X}_i$  e  $\bar{X}'_i$  a média dos valores observados e simulados,  $n$  o número de dados simulados,  $\sigma'_i$  o desvio padrão dos valores simulados,  $\sigma_i$  o desvio padrão dos registros observados e  $r$  o coeficiente de correlação entre os registros observados e simulados.

### 3.7 *Análise de frequência local em hidrologia*

A análise de frequência tem por objetivo relacionar a magnitude dos eventos hidrológicos com sua probabilidade de ocorrência, por meio de funções de probabilidade (NAGHETTINI E PINTO, 2007). No caso de valores máximos, costumam ser empregadas as distribuições de probabilidade Exponencial, Gamma, Gumbel, Generalizada de valores extremos (GEV), Log-Normal, Log-Pearson III e Pearson III.

O desenvolvimento deste tipo de análise demanda séries estacionárias, homogêneas e independentes, visto que como é indicado por Naghettini e Pinto (2007), essas premissas constituem a base de aplicação dos métodos estatísticos em variáveis hidrológicas. Uma vez constatado que as séries cumprem as premissas de base, se procede a identificar a função de probabilidade a que melhor se ajustam às séries estudadas, mediante a aplicação de testes de aderência. Dentre os testes de aderência usuais se encontram o de Kolmogorov-Smirnov, o de Anderson Darling e o Qui-Quadrado, maiores detalhes dos testes e exemplos de aplicação podem ser encontrados em Naghettini e Pinto (2007).

A seguir, são descritos os principais testes estatísticos aplicados na identificação das premissas bases, assim como algumas das principais distribuições de probabilidade empregadas no desenvolvimento das análises de frequências hidrológicas.

#### 3.7.1 *Teste de hipótese de independência*

A independência de uma série, implica que a ocorrência de um evento não tem relação com o acontecimento de outros. Como indicado por Naghettini e Pinto (2007), a rejeição ou não-rejeição da hipótese de independência de uma série hidrológica, é frequentemente decidida mediante a aplicação do teste não paramétrico de Wald e Wolfowitz (1943). Segundo o descrito por Naghettini e Pinto (2007), a estatística R é dado por:

$$R = \sum_{i=1}^{N-1} X'_i X'_{i+1} + X'_1 X'_N \quad [7]$$

Sendo  $X'_i$  a diferença entre a observação  $X_i$  e sua média amostral, e N o tamanho da amostra.

Sob a hipótese de que as observações são independentes, e que a distribuição de R pode se aproximar a uma distribuição normal, é possível estimar a média e variância como:

$$E[R] = -\frac{S_2}{N-1} \quad [8]$$

$$Var[R] = \frac{S_2^2 - S_4}{N-1} + \frac{S_2^2 - 2S_4}{(N-1)(N-2)} - \frac{S_2^2}{(N-1)^2} \quad [9]$$

Onde R denota a ordem dos momentos amostrais em relação à origem,  $S_r = Nm_r$ , sendo  $m_r$  expressado por:

$$m_r' = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} (X_i')^r}{N} \quad [10]$$

A partir do anterior é possível estimar a estatística T do teste por médio da seguinte expressão:

$$T = \frac{R - E[R]}{\sqrt{Var[R]}} \quad [11]$$

A hipótese Nula deve ser rejeitada se:

$$|T| > Z_{1-\alpha/2} \quad [12]$$

Sendo  $Z_{1-\alpha/2}$  a inversa da distribuição normal padrão de probabilidade  $1-\alpha/2$ , o nível de significância é definido como  $\alpha$ .

### 3.7.2 Teste de hipótese de Homogeneidade

A homogeneidade de uma série implica que todos os seus elementos provêm de uma mesma população. A rejeição ou não-rejeição da hipótese nula é frequentemente decidida mediante a aplicação do teste não paramétrico de Mann e Whitney (1947).

Segundo o descrito por Naghettini e Pinto (2007), a aplicação do teste requer que a divisão da série de estudo em duas subamostras,  $N_1$  e  $N_2$ , de modo que  $N_1 + N_2 = N$  e com  $N_1 \cong N_2$ . Efetuada a divisão da série, procede-se estimar a estatística V, que é dada pelo menor valor entre:

$$V_1 = N_1 N_2 + \frac{N_1(N_1 + 1)}{2} - R_1 \quad [13]$$

$$V_2 = N_1 N_2 - V_1 \quad [14]$$

Onde  $R_1$  denota a soma das ordens de classificação da primeira subamostra. Se  $N_1, N_2 > 20$ , e sob a hipótese que a distribuição de  $V$  pode se aproximar a uma distribuição normal, é possível estimar a média e variância como:

$$E[V] = \frac{N_1 N_2}{2} \quad [15]$$

$$Var[V] = \frac{N_1 N_2 (N_1 + N_2 + 1)}{12} \quad [16]$$

A partir do anterior é possível estimar o estatístico do teste por meio da seguinte expressão:

$$T = \frac{V - E[R]}{\sqrt{Var[R]}} \quad [17]$$

A hipótese Nula deve ser rejeitada se:

$$|T| > Z_{1-\alpha/2} \quad [18]$$

Sendo  $Z_{1-\alpha/2}$  a inversa da distribuição normal padrão de probabilidade  $1-\alpha/2$ , o nível de significância é definido como  $\alpha$ .

### 3.7.3 Teste de hipótese de Estacionariedade

A estacionariedade de uma série implica a inexistência de tendências nesta, mesmo que existam flutuações aleatórias, as observações amostrais se mantem estatisticamente invariantes com relação à cronologia de suas ocorrências (NAGHETTINI; PINTO, 2007). A rejeição ou não-rejeição da hipótese nula é frequentemente decidida mediante a aplicação do teste não paramétrico de Spearman, conforme o descrito por NERC (1975).

Segundo o descrito por Naghettini e Pinto (2007), a estatística base do teste é definida como:

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^N (m_t - T_t)^2}{N^3 - N} \quad [19]$$

Sendo:  $m_t$  as ordens de classificação das observações da série e  $T_t$  os índices de tempo (1,2, .. ,N).

Considerando que não existe correlação entre  $m_t$  e  $T_t$ , e sob a hipótese que a distribuição de  $r_s$  pode ser aproximada pela distribuição Normal, é possível estimar a média e variância como:

$$E[r_s] = 0 \quad [20]$$

$$Var[r_s] = \frac{1}{N-1} \quad [21]$$

A partir do anterior é possível estimar o estatístico do teste por meio da seguinte expressão:

$$T = \frac{r_s}{\sqrt{Var[r_s]}} \quad [22]$$

A hipótese Nula deve ser rejeitada se:

$$|T| > Z_{1-\alpha/2} \quad [23]$$

Sendo  $Z_{1-\alpha/2}$  a inversa da distribuição normal padrão de probabilidade  $1-\alpha/2$ , o nível de significância é definido como  $\alpha$ .

### 3.7.4 Distribuição de probabilidade Exponencial

Segundo Hosking (1993), a função acumulada de probabilidade Exponencial, com limite inferior  $\varepsilon$  e parâmetro de escala  $\alpha$ , pode ser descrita como:

$$F_x(x) = 1 - e^{-\frac{x-\varepsilon}{\alpha}} \quad [24]$$

O limite inferior e o parâmetro de escala costumam ser estimados a partir da função “*pelexp*” da livreria L-mom de Hosking (2015).

### 3.7.5 Distribuição de probabilidade Gamma

Segundo Naghettini e Pinto (2007), a função acumulada de probabilidade Gamma com parâmetros de forma e escala,  $\theta$  e  $\eta$ , pode ser descrita como:

$$F_x(x) = \int_0^x \frac{\left(\frac{x}{\theta}\right)^{\eta-1} \exp(-x/\theta)}{\theta \Gamma(\eta)} dx \quad [25]$$

Sendo  $x \geq 0$  e  $\Gamma(\cdot)$  a função Gamma

Os parâmetros de forma e escala podem ser estimados pela função “*pelgam*” da livreria L-mom de Hosking (2015).

### 3.7.6 Distribuição de probabilidade Gumbel

Segundo Hosking (1993), a função acumulada de probabilidade Gumbel com parâmetros de localização e escala,  $\varepsilon$  e  $\alpha$ , pode ser descrita como:

$$F_x(x) = e^{[-e^{-\frac{(x-\varepsilon)}{\alpha}}]} \quad [26]$$

Sendo  $-\infty < x < \infty$

Os parâmetros de forma e escala podem ser estimados com a função “*pelgum*” da livreria L-mom de Hosking (2015).

### 3.7.7 Distribuição de probabilidade Generalizada de valores Extremos (GEV)

Segundo Hosking (1993), a função acumulada de probabilidade GEV com parâmetros de localização ( $\varepsilon$ ), escala ( $\alpha$ ), e forma ( $k$ ) pode ser descrita como:

$$F_x(x) = e^{[-e^{-y}]} \quad [27]$$

Sendo:

$$y = \begin{cases} -k^{(-1)} \ln(1 - k(x - \varepsilon)/\alpha), & k \neq 0 \\ (x - \varepsilon)/\alpha, & k = 0 \end{cases} \quad [28]$$

Os parâmetros de escala, forma e localização podem ser estimados com a função “*pelgev*” da livreria L-mom de Hosking (2015).

### 3.7.8 Distribuição de probabilidade Log-Normal

Segundo Aparício (1992), a distribuição de probabilidade Log-Normal é modelada a partir dos logaritmos naturais da variável aleatória  $x$ , por meio da distribuição Normal de parâmetros de localização  $\mu$  e escala  $\sigma$ , a seguir, é apresentada a distribuição de probabilidade Normal.

$$F_x(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sigma' \sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{x' - \mu'}{\sigma'} \right)^2} dx \quad [29]$$

Sendo:  $\sigma'$  e  $\mu'$ , os parâmetros de escala e localização normalmente distribuídos dos logaritmos naturais da variável aleatória.

Os parâmetros de escala e localização podem ser estimados com a função “*pelnorm*” da livreria L-mom de Hosking (2015).

### 3.7.9 Distribuição de probabilidade Pearson III e Log-Pearson II

Segundo Naghettini e Pinto (2007), a função acumulada de probabilidade Pearson III com parâmetros de forma  $\beta$ , escala  $\alpha$  e localização  $\gamma$ , pode ser descrita como:

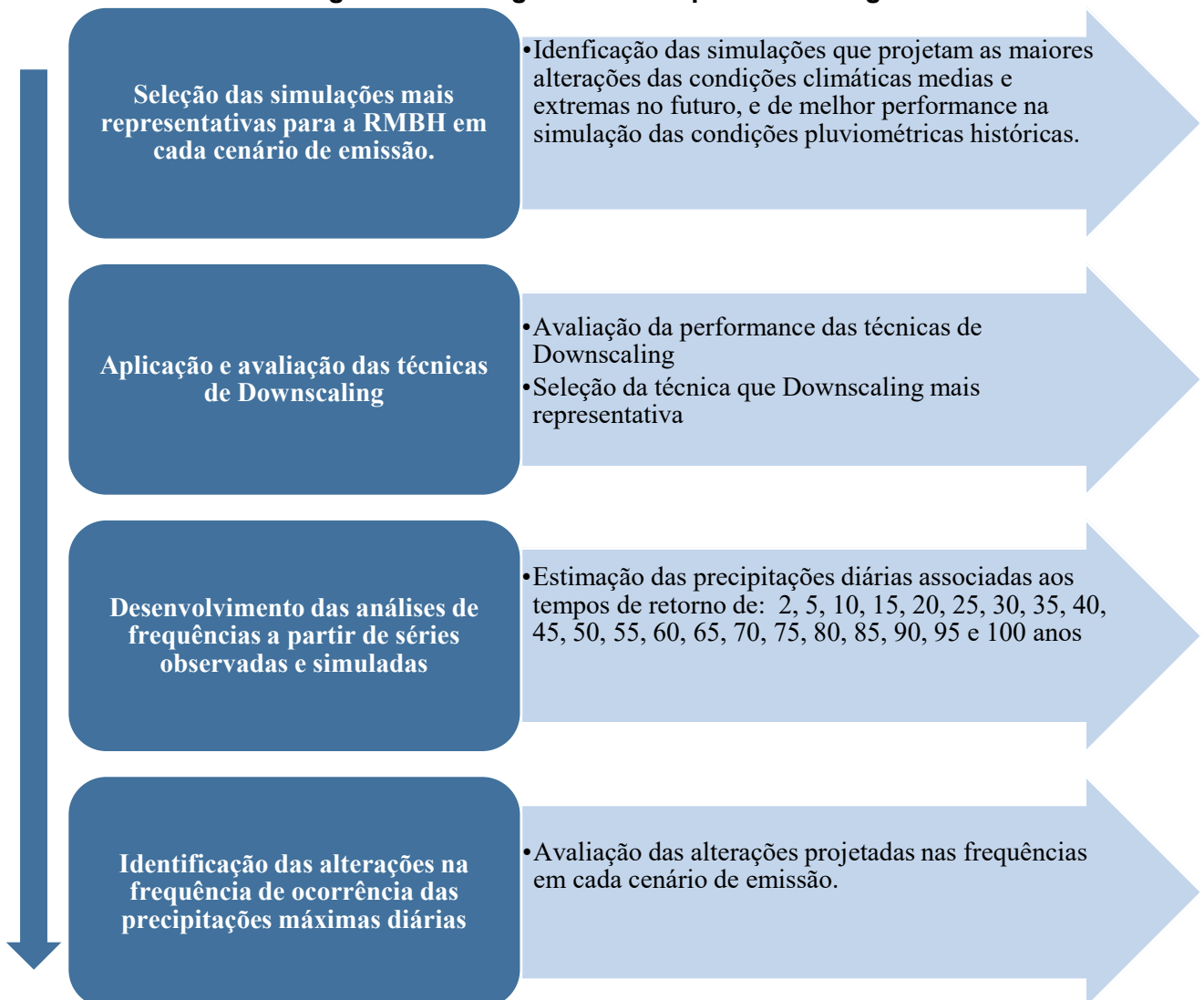
$$F_x(x) = \frac{1}{\alpha \Gamma(\beta)} \int_{\gamma}^{\infty} \left(\frac{x-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x-\gamma}{\alpha}\right)} dx \quad [30]$$

A função acumulada de probabilidade Log-Pearson II é modelada a partir dos logaritmos naturais da variável aleatória  $x$ , por meio da distribuição Pearson III. Os parâmetros de forma, escala e localização costumam ser estimados por meio da função “*pelpe3*” da livreria L-mom de Hosking (2015).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Como é apresentado na Figura 4-1, o trabalho foi desenvolvido a partir de quatro etapas metodológicas: i) Identificação e seleção das simulações de maior representatividade para a RMBH em cada cenário de emissão; ii) Aplicação e avaliação das técnicas de *Downscaling*; iii) Desenvolvimento da análise de frequência a partir das séries de precipitações diárias máximas por ano hidrológico (PDMA) observadas e projetadas; iv) Identificação das alterações na frequência de ocorrência das precipitações máximas diárias.

**Figura 4-1 Fluxograma das etapas metodológicas**



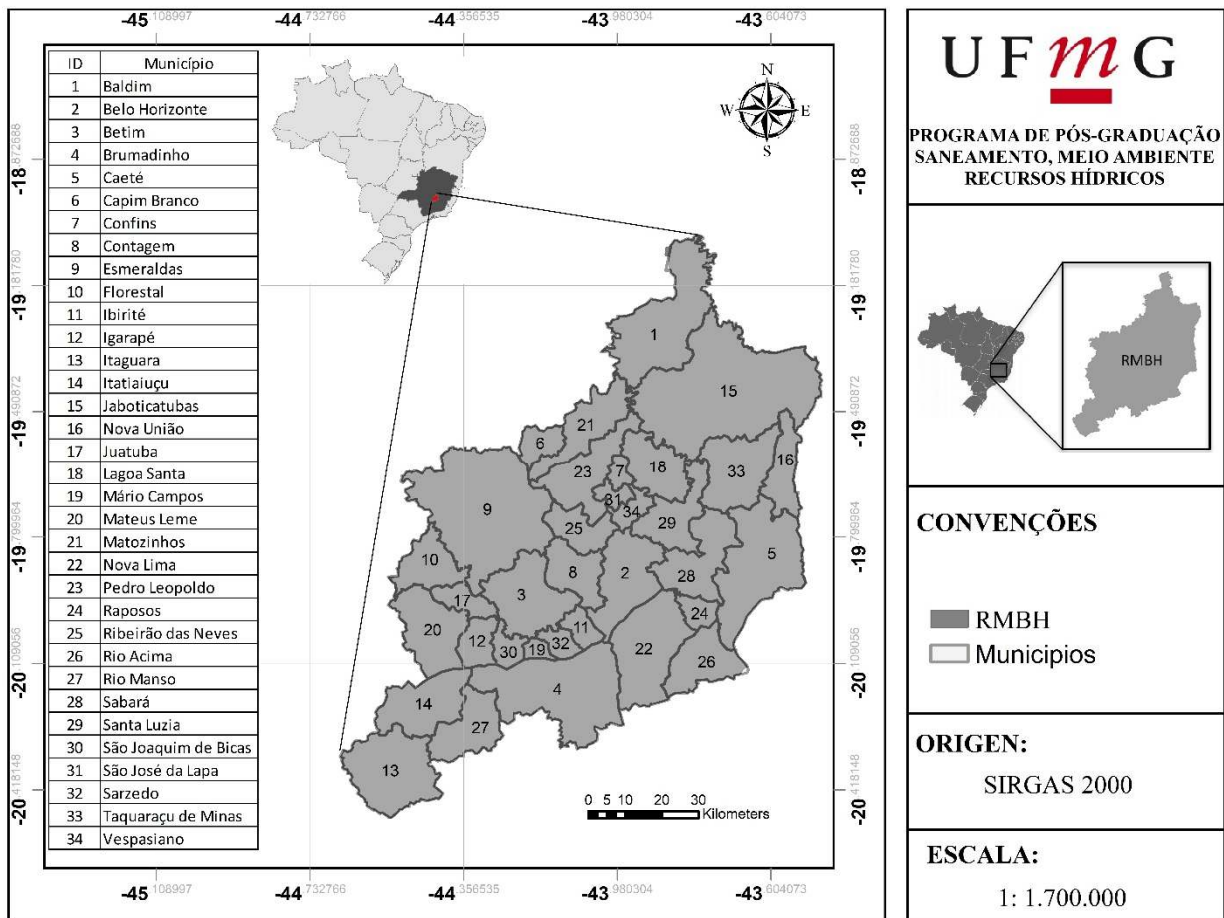
## 4.1 Área de estudo

### 4.1.1 Localização Geográfica, demografia e economia

A RMBH se encontra localizada na área central do estado de Minas Gerais, entre as latitudes 18,0° e 20,5° sul, e longitudes 43,15° e 44,75° este. De acordo com as projeções do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a população da RMBH para o 2021 era superior aos 6 milhões de habitantes, sendo considerada a terceira maior região metropolitana do Brasil, atrás somente de São Paulo e Rio de Janeiro.

Aproximadamente 42% da população da RMBH se encontra localizada em Belo Horizonte, enquanto 58% se encontra localizada nos restantes 33 municípios que a compõem. Segundo as estatísticas do IBGE, em 2019 a RMBH era a quarta cidade com maior produto interno bruto (PIB) do Brasil, atrás de São Paulo, Rio de Janeiro e Brasília. A seguir na Figura 4-2 é apresentado o mapa da RMBH, localizado no estado de Minas Gerais e de Brasil.

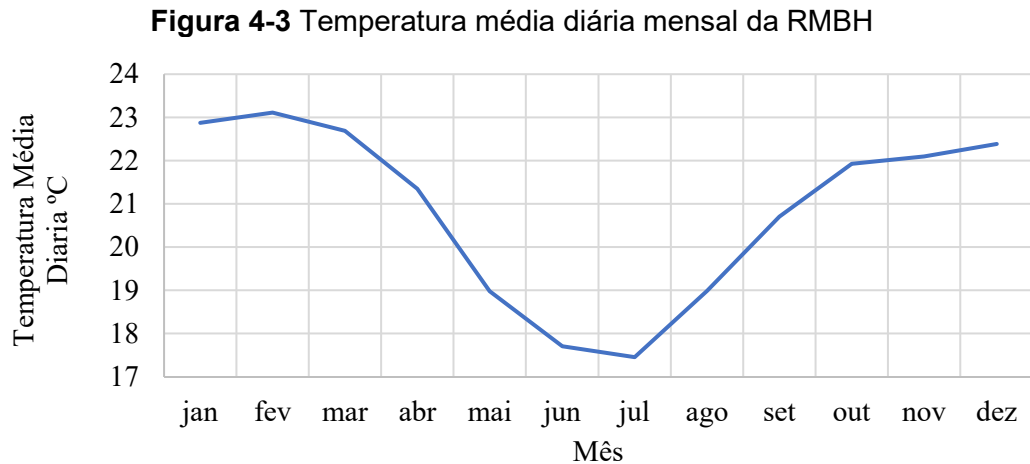
**Figura 4-2** Localização da área de estudo



Fonte: Elaboração própria.

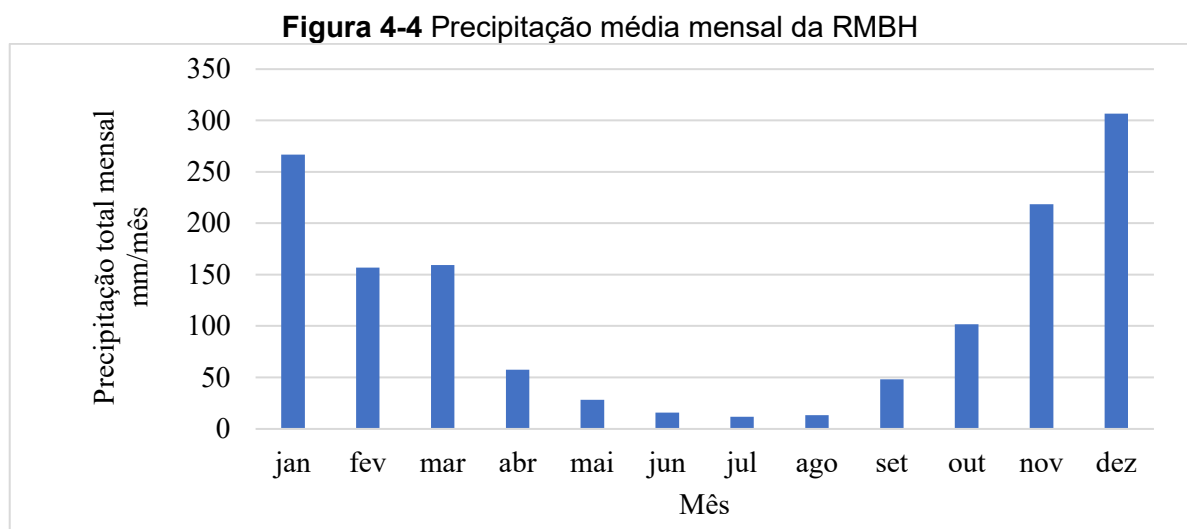
#### 4.1.2 Características climáticas

A RMBH se encontra localizada entre os 700 e os 1400 metros acima do nível do mar, sua temperatura média diária mensal varia entre 17 e 23,5 °C, sendo os meses de dezembro a março os mais cálidos e maio a agosto os mais frios (Ver Figura 4-3).



Fonte: Adaptado do Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil - INMET

De outra parte, as condições pluviométricas se caracterizam pelo início do ano hidrológico no mês de outubro, com a ocorrência do período chuvoso entre outubro e março e o período seco entre abril e setembro (ver Figura 4-4). A partir das séries de precipitação total anual por ano hidrológico das séries de estudo foi evidenciado que a precipitação média anual é de aproximadamente 1379 mm/ano, sendo os meses de dezembro e julho os de maior e menor pluviosidade respectivamente.



Fonte: Adaptado do Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil - INMET

No que respeita aos eventos extremos de precipitação, Nunes (2018) analisou os eventos históricos de alagamento registrados na RMBH, identificando que uma precipitação igual ou superior a 40 mm/dia pode ser considerada como indicadora da possibilidade de ocorrência de alagamentos.

## **4.2 Informação pluviométrica observada e projetada**

### **4.2.1 Aquisição dos registros pluviométricos históricos da RMBH**

A aquisição e seleção dos registros pluviométricos da RMBH contemplou 4 etapas: i) Identificação dos postos pluviométricos presentes na área de estudo; ii) Identificação das séries com registros pluviométricos superiores a 30 anos e dados faltantes inferiores a 10% da sua extensão; iii) Verificação da consistência e qualidade da informação pluviométrica obtida a partir da construção de curvas de dupla massa; iv) seleção das estações pluviométricas com mais de 20 anos de registros consistidos.

Na construção das curvas de dupla massa foram empregados como apoios as estações com distâncias inferiores a 44km da estação analisada, que apresentavam coeficientes de correlação lineares iguais ou superiores a 0,70 com a série analisada.

Os registros pluviométricos da RMBH foram obtidos no sistema de informação hidrológica Hidroweb, da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Um total de 129 estações pluviométricas foram identificadas na RMBH, no entanto, unicamente foi possível acessar à informação pluviométrica de 38 estações. Todavia, com o propósito de desenvolver a análise de consistência da estação Fazenda Caraíbas, a qual se encontrava a mais de 44km da estação pluviométrica mais próxima, foi necessário incluir duas estações da vizinhança. Sendo assim, foram analisados os registros de 40 estações pluviométricas.

A análise preliminar da informação pluviométrica deixou em evidencia que, das 38 estações presentes na RMBH, unicamente 30 apresentam mais de 30 anos de registros com dados faltantes inferiores ao 10%, não obstante, foi percebido que mesmo desconsiderando os anos que apresentam uma elevada quantidade de registros faltantes nas estações 01943000, 01943022 e 01943049, se garantia mais de 30 anos de registros pluviométricos.

Por outra parte, foi desconsiderada a informação pluviométrica da estação 02043057, visto que seus registros vão até 1981, e considerando que a estação 02043042 apresenta informação

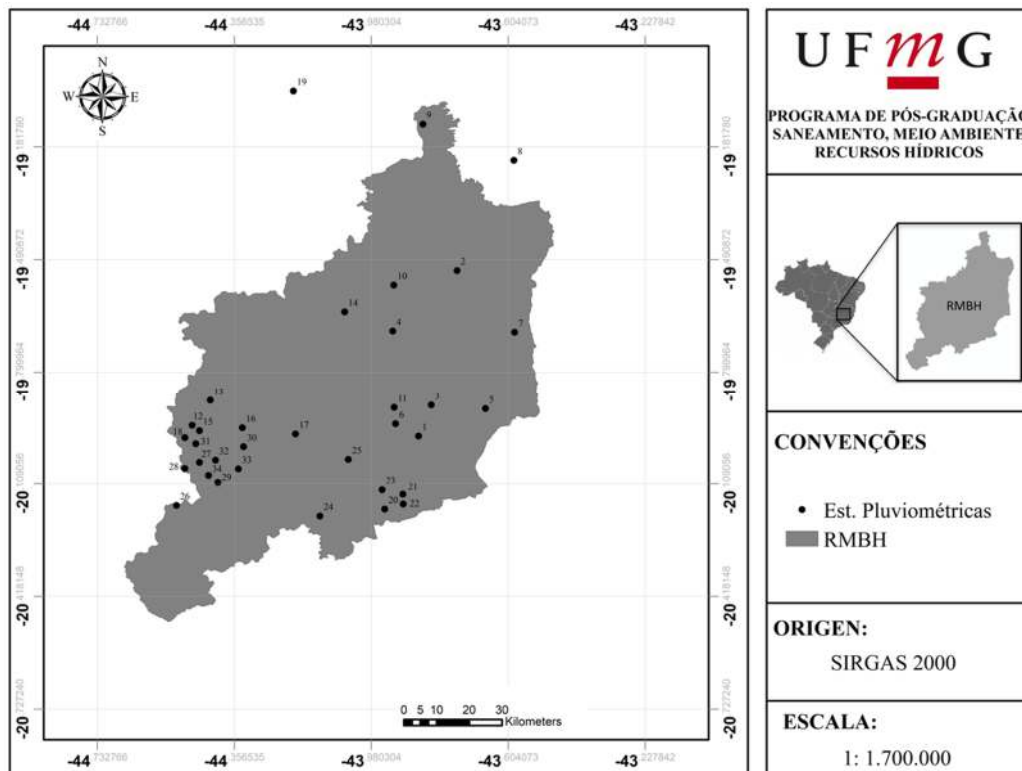
pluviométrica mais recente e está localizada a menos de 110 metros desta (ver Figura 4-5), optou-se por empregar unicamente a informação recente, desta forma, a análise de consistência e qualidade foi desenvolvida para as 34 estações apresentadas na Figura 4-6 e Tabela 4-1.

**Figura 4-5 Localização das estações 02043057 e 02043042**



Fonte: adaptado de Google Earth.

**Figura 4-6 Estações pluviométricas Empregadas na análise de consistência.**



Fonte: Elaboração própria.

**Tabela 4-1 Estações empregadas na análise de consistência**

| ID | Nome                               | Código   | Latitude <sup>2</sup> | Longitude <sup>2</sup> | Dados Faltantes (%) | Anos disponíveis |
|----|------------------------------------|----------|-----------------------|------------------------|---------------------|------------------|
| 1  | Mineração Morro Velho              | 01943000 | -19,979               | -43,85                 | 59,69               | 164              |
| 2  | Jaboticatubas                      | 01943004 | -19,521               | -43,744                | 3,86                | 80               |
| 3  | Sabará                             | 01943006 | -19,893               | -43,815                | 7,26                | 80               |
| 4  | vespasio                           | 01943009 | -19,687               | -43,921                | 4,15                | 80               |
| 5  | Caeté                              | 01943010 | -19,903               | -43,666                | 2,69                | 80               |
| 6  | Caixa de Areia                     | 01943022 | -19,945               | -43,913                | 15,13               | 81               |
| 7  | José de Melo                       | 01943024 | -19,69                | -43,586                | 3,76                | 73               |
| 8  | Vau da Lagoa <sup>1</sup>          | 01943035 | -19,219               | -43,588                | 2,44                | 67               |
| 9  | Fazenda Caraibas                   | 01943042 | -19,12                | -43,838                | 3,51                | 47               |
| 10 | Ponte Raul Soares                  | 01943049 | -19,561               | -43,918                | 10,05               | 48               |
| 11 | Belo Horizonte (horto)             | 01943055 | -19,9                 | -43,917                | 0,10                | 59               |
| 12 | Ponte Nova do Paraopeba            | 01944004 | -19,949               | -44,472                | 0,84                | 80               |
| 13 | Fazenda Escola Florestal           | 01944007 | -19,88                | -44,422                | 5,27                | 80               |
| 14 | Pedro Leopoldo                     | 01944009 | -19,634               | -44,053                | 4,51                | 80               |
| 15 | Barro Preto                        | 01944026 | -19,964               | -44,452                | 0,79                | 50               |
| 16 | Juatuba                            | 01944027 | -19,956               | -44,334                | 6,09                | 51               |
| 17 | Betim – Copasa                     | 01944055 | -19,973               | -44,188                | 9,47                | 45               |
| 18 | Fazenda Santa Rita                 | 01944062 | -19,983               | -44,492                | 9,69                | 33               |
| 19 | Fazenda Capão do Gado <sup>1</sup> | 01944068 | -19,029               | -44,194                | 1,60                | 22               |
| 20 | Lagoa Grande (mmv)                 | 02043002 | -20,179               | -43,943                | 4,76                | 80               |
| 21 | Rio do Peixe (mmv)                 | 02043004 | -20,138               | -43,893                | 3,78                | 79               |
| 22 | Represa das Codornas (mmv)         | 02043042 | -20,165               | -43,892                | 1,51                | 45               |
| 23 | Represa do Miguelo (mmv)          | 02043043 | -20,126               | -43,95                 | 2,46                | 45               |
| 24 | Melo Franco                        | 02044008 | -20,198               | -44,121                | 3,93                | 79               |
| 25 | Ibirité                            | 02044012 | -20,043               | -44,043                | 2,60                | 71               |
| 26 | Fazenda Benedito Chaves            | 02044016 | -20,169               | -44,515                | 2,15                | 51               |
| 27 | Fazenda Vista Alegre               | 02044019 | -20,051               | -44,452                | 1,17                | 51               |
| 28 | Calambau                           | 02044020 | -20,068               | -44,492                | 5,48                | 51               |
| 29 | Alto da Boa Vista                  | 02044021 | -20,106               | -44,401                | 1,76                | 48               |
| 30 | Fazenda Currealinho                | 02044024 | -20,008               | -44,331                | 1,10                | 49               |
| 31 | Estiva                             | 02044043 | -20                   | -44,462                | 3,26                | 44               |
| 32 | Jardim                             | 02044052 | -20,045               | -44,408                | 0,40                | 39               |
| 33 | Escola de Veterinária              | 02044053 | -20,069               | -44,345                | 0,86                | 35               |
| 34 | Serra Azul                         | 02044054 | -20,087               | -44,427                | 0,35                | 34               |

(1) Estão da vizinhança

(2) Sistema de Referência Geocêntrico SIRGAS 2000

No apêndice 1 são apresentadas as estaoes que foram empregadas como apoios durante a construo das curvas de dupla massa. De outra parte, a análise de consistência das séries pluviométricas deixou em evidência a viabilidade de empregar a informao pluviométrica das 32 estaoes presente na RMBH, visto que todas dispõem de mais de 20 anos de registros

consistidos. No Apêndice 2, são apresentadas as curvas de dupla massa obtidas na análise de consistência.

#### **4.2.2 Obtenção das simulações de temperatura e precipitação históricas e futuras para os cenários de emissão SSP1-2.6 e SSP5-8.5**

No presente trabalho, foram empregadas as simulações diárias de precipitação e temperatura dos modelos de circulação geral com resolução horizontal de 100 km, disponibilizados no CMIP6 para os cenários de emissão SSP1-2.6 e SSP5-8.5.

Dentre o conjunto de modelos e ensembles disponibilizados em <https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6/>, optou-se por selecionar aqueles que tiveram simulações de precipitação, temperatura máxima, média e mínima na escala diária, tanto no passado (1970-2014) quanto no futuro (2015-2100), ressaltando a adoção do período futuro corresponde ao pré-estabelecido pelo CMIP6, desta forma, a partir de 2015 as simulações contemplam as perturbações atmosféricas projetadas por cada um dos cenários de emissão.

No total foram adquiridas 70 simulações de 12 modelos no cenário de emissão SSP1-2.6, e 76 simulações de 15 modelos no cenário de emissões SSP5-8.5, processando assim mais de quatro terabytes de informação. No Apêndice 3 são apresentadas as simulações adquiridas em cada cenário de emissão.

Levando em consideração que as simulações são disponibilizadas em formato NetCDF4, foi necessário desenvolver scripts na linguagem de programação Matlab 2020<sup>a</sup> que permitiram sua manipulação e processamento em formato raster.

### **4.3 Procedimentos metodológicos**

#### **4.3.1 Identificação e seleção das simulações de maior representatividade para a RMBH em cada cenário de emissão**

A identificação e seleção das simulações de temperatura e precipitação de maior representatividade para a RMBH, nos cenários de emissão SSP1-2.6 e SSP5-8.5, foi realizada a partir da metodologia descrita por Lutz *et al* (2016), visto que, sua aplicação permite identificar as simulações que representam todos os possíveis futuros climáticos em termos de: temperatura média, precipitação total e mudanças climáticas extremas.

Desta forma, a metodologia propõe a ocorrência de quatro futuros climáticos: Quente-úmido (QU), Quente-seco (QS), Frio-úmido (FU) e Frio-seco (FS). No caso do cenário Quente-úmido, é contemplado um forte incremento da temperatura e precipitação para o final do século XXI, enquanto no cenário Frio-Seco é esperada um leve incremento tanto da temperatura quanto da precipitação, por outra parte, o cenário Quente-seco contempla um forte incremento da temperatura e um leve aumento da precipitação, e finalmente, o cenário Frio-úmido projeta a um leve aumento da temperatura e um forte incremento da precipitação para o final do século XXI.

Deste modo, a identificação das simulações de maior representatividade em cada um dos quatro futuros climáticos foi realizada em 3 etapas: i) Identificação das mudanças climáticas médias; ii) Identificação das mudanças climáticas extremas; iii) Avaliação da capacidade de representação do clima histórico.

#### **4.3.2 Identificação das mudanças climáticas médias**

Nesta etapa, foram selecionadas as simulações que projetam as maiores variações de: temperatura média diária e precipitação total, entre o período histórico (1971-2000) e futuro (2071-2100), em cada um dos cenários de emissão avaliados (SSP1-2.6 e SSP5-8.5).

Considerando que as simulações de temperatura e precipitação se encontravam em formato raster, e que a área de estudo engloba n número de pixels, estimou-se para cada pixel a temperatura média diária e a precipitação total do período histórico e futuro, em seguida, foi calculada a diferença percentual da precipitação total e a diferença da temperatura média diária

simulada em cada pixel, adotando finalmente suas médias como as variações da temperatura média diária ( $\Delta T$ ) e da precipitação total ( $\Delta P$ ).

Visto que  $\Delta T$  e  $\Delta P$  foram estimadas para cada uma das simulações adquiridas na etapa 4.2.2, e que Lutz *et al* (2016) estabelecem que, as combinações do 10° e 90° percentil do conjunto de  $\Delta T$  e  $\Delta P$  formam os pares de pontos centrais dos climas futuros: Quente-úmido, Quente-seco, Frio-úmido e Frio-seco como ilustra a Tabela 4-2, procedeu-se a identificação das cinco simulações mais representativas de cada clima futuro por meio da distância euclidiana. Deste modo, para cada clima futuro foram selecionadas as cinco simulações mais próximas a cada ponto central.

**Tabela 4-2 Pontos centrais dos climas futuros**

| Clima Futuro      | Coordenada do ponto central                |
|-------------------|--|
| Frio-Úmido (FU)   | $\Delta T^{10^\circ}, \Delta P^{90^\circ}$ |
| Frio-Seco (FS)    | $\Delta T^{10^\circ}, \Delta P^{10^\circ}$ |
| Quente-Úmido (QU) | $\Delta T^{90^\circ}, \Delta P^{90^\circ}$ |
| Quente-Seco (QS)  | $\Delta T^{90^\circ}, \Delta P^{10^\circ}$ |

Antes de realizar qualquer estimativa, buscou-se normalizar o conjunto de dados de  $\Delta T$  e  $\Delta P$ ,  $(x - \text{média})/DP$ , visto que apresentavam unidades diferentes (°C e % respectivamente).

A execução desta etapa, permitiu reduzir a vinte o número de simulações a serem contempladas no desenvolvimento do estudo, cinco por cada clima futuro.

### 4.3.3 Identificação das mudanças climáticas extremas

Dentre as cinco simulações mais representativas de cada clima futuro, procurou-se selecionar as duas que projetavam as maiores alterações das condições climáticas extremas no final do século XXI, em termos de temperatura e precipitação, para o qual, foram empregados os índices: R99pTOT, CDD, WSDI e CSDI do “*Expert team on climate change detection and indices- ETCCDP*”.

Assim, em cada clima futuro foi avaliada a variação percentual dos dois índices apresentados na Tabela 4-3, entre o período histórico e futuro.

**Tabela 4-3 Índices do ETCCDI contemplados na avaliação das mudanças climáticas extremas**

| Cenário Climático Futuro | Índices de Avaliação |
|--------------------------|----------------------|
| Frio-Úmido               | CSDI-R99TOT          |
| Frio-Seco                | CSDI-CDD             |
| Quente-Úmido             | WSDI- R99pTOT        |
| Quente-Seco              | WSDI-CDD             |

Cada um dos índices apresentados na Tabela 4-3, foram estimados conforme apresentado a seguir:

- **R99pTOT:** Este índice estima a percentagem da precipitação total associada a eventos extremos.

$$R99pTOT = \frac{R99p}{PRCPTOT} * 100 \quad [31]$$

Sendo:  $PRCPTOT$  a precipitação total registrada no período  $j$ ,  $R99P$  a soma dos eventos em que  $RR_{wj}$  foi maior que  $RR_{wn}99$ , sendo  $RR_{wj}$  a precipitação do dia  $w$  no período  $j$  e  $RR_{wn}99$  o percentil 99º dos dias úmidos ( $P > 1\text{mm}$ ), para o período de referência (UNSW, 2020). No caso do presente trabalho o período de referência adotado foi 1971-1999.

- **CDD:** Este índice estima a máxima quantidade de dias consecutivos sem precipitação.

$$CDD = RR_{ij} \quad [32]$$

Sendo:  $RR_{ij}$  o máximo número de dias consecutivos sem precipitação do período  $j$ .

- **WSDI:** Este índice estima o número de dias que registraram temperaturas máximas diárias superiores à temperatura máxima do percentil 90º, num lapso de pelo menos 6 dias consecutivos (ZHANG; YANG, 2004).

$$TX_{ij} > TX_{in}90 \quad [33]$$

Sendo:  $TX_{ij}$  a temperatura máxima do dia  $i$  e período  $j$ ,  $TX_{in}90$  a temperatura máxima associada ao percentil 90º no período de referência, estimado com uma janela móvel de

5 dias. Para cada período  $j$ , são somados o número de dias em que  $TX_{ij}$  é superior a  $TX_{in}90$  em pelo menos 6 dias consecutivos.

- **CSDI:** Este índice estima o número de dias com temperaturas mínimas diárias inferiores à temperatura do associada ao 10º percentil no período de referência, estimado com uma janela móvel de 5 dias (SILLMANN et al., 2013).

$$TX_{ij} < TX_{in}10 \quad [34]$$

Sendo:  $TX_{ij}$  a temperatura mínima no dia  $i$  do período  $j$ ,  $TX_{in}10$  a temperatura associada ao 10º percentil, estimado com uma janela móvel de 5 dias para o período de referência. Em cada período  $j$  serão somados o número de dias em que  $TX_{ij}$  é menor que  $TX_{in}10$  em pelo menos 6 dias consecutivos.

Visto que a RMBH engloba  $n$  pixels, os índices de cada simulação foram estimados como a média dos  $n$  valores, é dizer, para cada simulação foram estimados os índices a nível de pixel, e em seguida foi calculado o valor médio destes.

Os índices para cada simulação foram estimados anualmente, tanto no período histórico quanto no futuro, não obstante, a estimativa da variação percentual foi realizada a partir dos seus valores médios, por meio da seguinte expressão:

$$V_i = \frac{\bar{I}_{i,f} - \bar{I}_{i,h}}{\bar{I}_{i,h}} * 100 \quad [35]$$

Sendo:  $V_i$ , a variação percentual do índice  $i$  entre o período histórico e futuro,  $\bar{I}_{i,f}$  o valor médio do índice  $i$  no futuro,  $\bar{I}_{i,h}$  valor médio do índice  $i$  no período histórico.

As variações percentuais de cada índice foram avaliadas com notas de 1 a 5, conforme o seu grau de alteração, assim, à simulação que apresentou a menor variação lhe foi atribuída uma nota de 1, enquanto a nota de 5 foi atribuída à simulação que apresentou a maior variação percentual.

Considerando que cada simulação foi avaliada por meio de dois índices que, por sua vez, foram avaliados com notas de 1 a 5, foi efetuada a pontuação de cada simulação com a média das

notas, como por exemplo, se a simulação I apresentou notas de 1 e 5 para os índices R99pTOT e CSDI, sua pontuação final foi 3.

A nota final das simulações está diretamente relacionada às mudanças das condições climáticas extremas no final do século XXI, é dizer, quanto maior for a nota final da simulação, maior serão as alterações das condições climáticas extremas projetadas por esta. Conhecidas as notas de cada simulação, escolheu-se as duas que apresentaram as maiores pontuações em cada futuro climático, reduzindo desta forma, o número de simulações de cinco para dois.

#### **4.3.4 Avaliação da capacidade de representação do clima histórico**

Reconhecidas as duas simulações que projetam as maiores alterações nas características climáticas médias e extremas para o final do século XXI, procedeu-se à verificação da sua capacidade de reproduzir as condições pluviométricas históricas, para o qual, foi identificado o pixel em que se encontravam inseridas cada uma das estações selecionadas na etapa 4.2.1, em seguida, extraiu-se destes as precipitações diárias simuladas no período histórico.

A capacidade de reprodução das condições pluviométricas históricas foi avaliada a partir das séries diárias de precipitação observadas e simuladas, adotando como métricas de erro os coeficientes de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), Kling-Gupta (KGE) e da raiz do erro quadrático médio (RMSE).

Considerando que cada simulação iria ter mais de um conjunto de métricas de erro (uma por cada estação), optou-se por estimar as médias destas, selecionando assim, as simulações que apresentaram os melhores desempenhos na reprodução das condições pluviométricas históricas em cada futuro climático.

#### **4.4 Aplicação e avaliação das técnicas de Downscaling**

Identificadas as simulações mais representativas de cada clima futuro, em cada cenário de emissão, realizou-se o desenvolvimento do *Downscaling*, a partir de técnicas estatísticas e de métodos baseados em inteligência artificial.

As técnicas estatísticas avaliadas foram o método Delta e o mapeamento de Quantis (QQ), enquanto, os métodos de inteligência artificial contemplaram o uso de algoritmos baseados em

programação genética (PG) e árvores de regressão (AR). O desempenho das técnicas de *Downscaling* foi avaliado com o NSE, KGE e RMSE.

A redução de escala foi aplicada inicialmente às simulações diárias de precipitação do período histórico (1970-2014), com o propósito de identificar e selecionar a técnica de *Downscaling* que melhor se ajustava aos objetivos estabelecidos.

No caso dos métodos baseados em inteligência artificial optou-se por empregar a precipitação simulada como única variável preditora, visto que como foi mencionado na seção 3.3.3, quanto menor for o número de variáveis preditoras, menor serão as incertezas associadas a este processo, dessa forma, a redução de escala foi desenvolvida a partir dos Quantis das precipitações observadas e simuladas.

O propósito de implementar uma redução de escala baseada em Quantis, era conseguir descrever as precipitações futuras que se apresentariam em cada estação pluviométrica a partir de uma função do tipo:

$$Q_{Obs_i} = f(P_{MCG}) \quad [36]$$

sendo:  $Q_{Obs_i}$ , o Quantil que se apresentaria na estação pluviométrica  $i$ , caso a precipitação simulada fosse  $P_{MCG}$  e  $f(P_{MCG})$  é a função matemática que descreve as relações entre os Quantis da precipitação observada na estação e simulada pelo MCG. Tanto  $Q_{Obs_i}$  como  $P_{MCG}$  são expressos em mm/dia.

De outra parte, a seleção da técnica de redução de escala foi realizada a partir da comparação do número de dias chuvosos no ano hidrológico, da precipitação total anual por ano hidrológico e das frequências de ocorrência das PDMA, estimadas tanto com as séries obtidas após a aplicação do *Downscaling* quanto com as observadas, implementando finalmente, a técnica de *Downscaling* que permitiu obter a melhor performance em termos de NSE, KGE e RMSE.

As precipitações históricas e futuras simuladas foram obtidas dos pixels das simulações, deste modo, foram garantidas séries pluviométricas observadas e simuladas para cada uma das estações da etapa 4.2.1. A seleção de cada pixel se realizou de acordo à posição geográfica do ponto de monitoramento, deste modo, o pixel selecionado foi aquele em que se encontrava inserida a estação pluviométrica.

Obtidas as séries simuladas para cada estação da etapa 4.2.1, buscou-se aplicar e avaliar as técnicas de *Downscaling*, no caso das técnicas baseadas em inteligência artificial foi empregada a aplicação “*Classification learner*” de Matlab 2020<sup>a</sup> e o algoritmo GPTIPS desenvolvido por Searson (2010), ressaltando que, a aplicação “*Classification learner*” foi empregada no caso das árvores de regressão, e o algoritmo GPTIPS no caso da programação genética.

O algoritmo baseado em programação genética foi treinado com uma população inicial de 200 indivíduos, um número máximo de 150 gerações, taxas de cruzamento e mutação de 80 e 10% respectivamente e contemplando o uso das funções: soma, subtração, divisão e multiplicação. É importante ressaltar que foram adotadas essas condições de contorno visto que, depois de experimentar diversas configurações, percebeu-se que essas garantiam os melhores resultados no menor tempo computacional.

No caso do algoritmo baseado em árvores de regressão, foi empregada a configuração *default*, visto que esta permitia obter modelos com boa performance. Finalmente, nas séries pluviométricas futuras de cada simulação foi aplicada a técnica de redução de escala que apresentou a melhor performance em termos de NSE, RMSE e KGE.

#### **4.5 Análise de frequência das precipitações diárias máximas por ano hidrológico (PDMA) das séries observadas e projetadas**

A análise de frequência foi desenvolvida tanto no período histórico quanto no futuro, a partir das séries de PDMA observadas e simuladas. No caso histórico, as PDMA foram estimadas a partir das séries consistidas de cada estação, enquanto as do futuro foram calculadas a partir das séries de precipitação obtidas no processo de *Downscaling*.

Inicialmente, verificou-se a estacionariedade, independência e homogeneidade das séries de precipitações máximas observadas e projetadas em cada estação, mediante a aplicação dos testes estatísticos de: Spearman (NERC, 1975), Wald-Wolfowitz (1943) e Mann-Whitney (1947). Os testes foram aplicados com um nível de significância do 2%, segundo o apresentados por Naghettini e Pinto (2007).

Em seguida, foram desenvolvidas as análises de frequência e estimados os quantis para os tempos de retorno de 2, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95 e 100 anos. As distribuições de probabilidade avaliadas foram: Gamma, GEV, Gumbel, Log-Normal, Pearson III, e Log-Pearson III. A aderência das séries às funções de probabilidade

avaliou-se a partir do teste estatístico de Kolmogorov Smirnov, enquanto que, os parâmetros destas foram calculados a partir do método dos momentos-L, segundo o descrito por Hosking e Wallis (1993).

Com o propósito de identificar as eventuais alterações das alturas de precipitação no curto, médio e longo prazo, dividiu-se as séries futuras de cada simulação em três, 2016-2043, 2044-2071, 2072-2099. No caso do período histórico, foram empregadas as séries históricas observadas até o 2015, visto que desta forma evitou-se a sobreposição temporal das séries históricas e projetadas.

#### **4.6 Identificação das alterações na frequência de ocorrência das precipitações máximas diárias**

Para cada possível clima futuro foram estimadas as alterações nas frequências de ocorrência no curto, médio e longo termo, adotando assim os períodos 2016-2043, 2044-2071 e 2072-2099. Deste modo, para cada período e clima futuro foram calculadas as diferenças entre os quantis estimados com as séries históricas e de *Downscaling*, nos diferentes tempos de retorno.

Levando em consideração que cada estação apresentava suas próprias alterações, procurou-se estimar a tendência geral destas, para o qual, foi estimada a percentagem de estações que projetavam incrementos e diminuições das alturas de precipitação diária associada aos diferentes tempos de retorno avaliados.

Uma vez identificada a tendência geral, buscou-se descrevê-la e analisá-la, de forma quantitativa e qualitativa.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Identificação e seleção das simulações de maior representatividade para a RMBH em cada cenário de emissão

Nos próximos itens são apresentados os resultados obtidos na etapa de identificação e seleção das simulações de maior representatividade para a RMBH, ressaltando que os procedimentos metodológicos aplicados foram os mesmos nos dois cenários de emissão.

#### 5.1.1 Identificação das mudanças climáticas médias

A seleção inicial esteve baseada na variação das condições climáticas médias projetadas num século, deste modo, foi avaliada a diferença de temperatura média diária e a variação percentual da precipitação total entre o período histórico (1971-2000) e futuro (2071-2100).

A seguir na Tabela 5-1 são apresentados os pontos centrais de cada clima futuro, enquanto que na Figura 5-1 e Tabela 5-2, para cada cenário de emissão são apresentadas as simulações que projetam as maiores alterações das condições climáticas médias em cada um dos climas futuros.

**Tabela 5-1 pontos centrais de cada clima futuro em cada cenário de emissão.**

| Clima Futuro | SSP1-2.6              |                       | SSP5-8.5              |                       |
|--------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|              | Coordenada $\Delta T$ | Coordenada $\Delta P$ | Coordenada $\Delta T$ | Coordenada $\Delta P$ |
| Quente-úmido | 1,17                  | 1,24                  | 0,89                  | 1,35                  |
| Quente-seco  | 1,17                  | -1,25                 | 0,89                  | -1,19                 |
| Frio-úmido   | -1,14                 | 1,24                  | -1,61                 | 1,35                  |
| Frio-seco    | -1,14                 | -1,25                 | -1,61                 | -1,19                 |

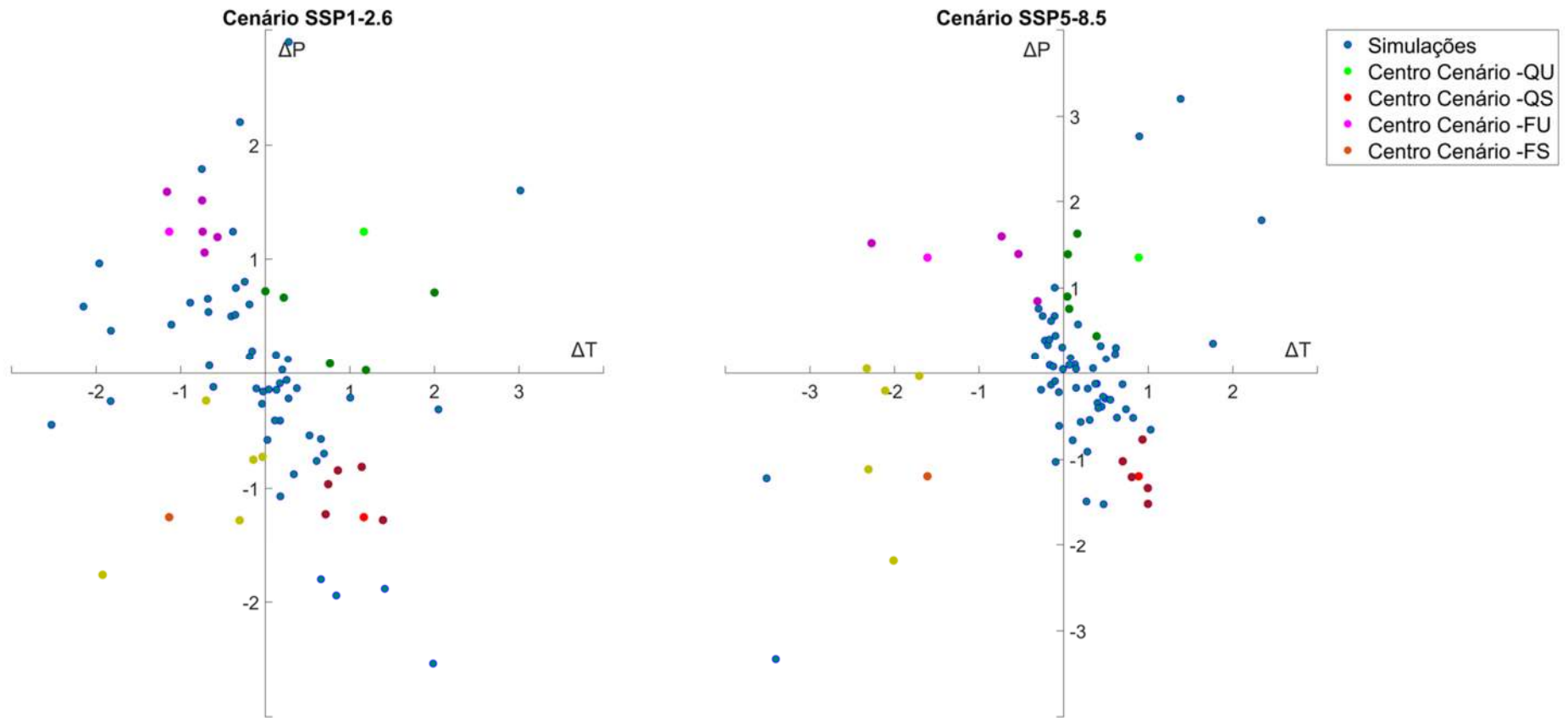
Nota: Os pontos centrais correspondem ao conjunto de pontos normalizados

**Tabela 5-2 Simulações que projetam as maiores mudanças climáticas médias na RMBH para o final do século XXI em cada cenário de emissão.**

| SSP1-26 |                |                    |                   |                               |                              | SSP5-85          |                    |                   |                               |                              |        |
|---------|----------------|--------------------|-------------------|-------------------------------|------------------------------|------------------|--------------------|-------------------|-------------------------------|------------------------------|--------|
| ID      | Simulação      | $\Delta T$<br>(°C) | $\Delta P$<br>(%) | $\overline{\Delta T}$<br>(°C) | $\overline{\Delta P}$<br>(%) | Simulação        | $\Delta T$<br>(°C) | $\Delta P$<br>(%) | $\overline{\Delta T}$<br>(°C) | $\overline{\Delta P}$<br>(%) | Futuro |
| 1       | CMCC-ESM2-R1   | 2,4                | 2,7               | 2,0                           | 1,2                          | CMCC-ESM2-R1     | 5,0                | 6,3               | 5,0                           | 2,6                          | QU     |
| 2       | EC-Earth3-R139 | 1,8                | 2,4               |                               |                              | EC-Earth3-R131   | 5,0                | 4,8               |                               |                              | QU     |
| 3       | EC-Earth3-R11  | 2,1                | -1,1              |                               |                              | EC-Earth3-R11    | 5,0                | 1,9               |                               |                              | QU     |
| 4       | EC-Earth3-R144 | 2,0                | -0,8              |                               |                              | EC-Earth3-R149   | 5,0                | 1,0               |                               |                              | QU     |
| 5       | EC-Earth3-R124 | 1,8                | 2,7               |                               |                              | EC-Earth3-R124   | 5,2                | -0,9              |                               |                              | QU     |
| 6       | EC-Earth3-R141 | 2,2                | -8,2              | 2,0                           | -6,8                         | EC-Earth3-R122   | 5,3                | -10,9             | 5,4                           | -10,6                        | QS     |
| 7       | EC-Earth3-R114 | 2,1                | -5,7              |                               |                              | EC-Earth3-R105   | 5,4                | -11,6             |                               |                              | QS     |
| 8       | EC-Earth3-R143 | 2,0                | -7,9              |                               |                              | EC-Earth3-R128   | 5,3                | -9,8              |                               |                              | QS     |
| 9       | EC-Earth3-R110 | 2,0                | -5,8              |                               |                              | EC-Earth3-R141   | 5,4                | -12,7             |                               |                              | QS     |
| 10      | EC-Earth3-R148 | 2,0                | -6,5              |                               |                              | EC-Earth3-Veg-R2 | 5,4                | -8,2              |                               |                              | QS     |
| 11      | EC-Earth3-R138 | 1,4                | 7,4               | 1,5                           | 6,0                          | MRI-ESM2-0-R1    | 3,9                | 5,6               | 4,5                           | 2,9                          | FU     |
| 12      | EC-Earth3-R102 | 1,5                | 5,6               |                               |                              | EC-Earth3-R109   | 4,6                | 6,1               |                               |                              | FU     |
| 13      | EC-Earth3-R140 | 1,5                | 4,6               |                               |                              | EC-Earth3-R116   | 4,7                | 4,8               |                               |                              | FU     |
| 14      | EC-Earth3-R126 | 1,5                | 7,0               |                               |                              | NorESM2-MM-R1    | 4,2                | -3,8              |                               |                              | FU     |
| 15      | EC-Earth3-R116 | 1,6                | 5,3               |                               |                              | EC-Earth3-R138   | 4,8                | 1,5               |                               |                              | FU     |
| 16      | EC-Earth3-R122 | 1,7                | -8,2              | 1,6                           | -6,4                         | GFDL-ESM4-R1     | 3,9                | -10,3             | 4,0                           | -7,8                         | FS     |
| 17      | INM-CM5-0-R1   | 1,2                | -10,9             |                               |                              | GFDL-CM4-R1      | 4,1                | -16,8             |                               |                              | FS     |
| 18      | EC-Earth3-R4   | 1,6                | -2,5              |                               |                              | MPI-ESM1-2-HR-R1 | 4,0                | -4,8              |                               |                              | FS     |
| 19      | EC-Earth3-R109 | 1,7                | -5,3              |                               |                              | NorESM2-MM-R1    | 4,2                | -3,8              |                               |                              | FS     |
| 20      | EC-Earth3-R121 | 1,8                | -5,2              |                               |                              | MPI-ESM1-2-HR-R2 | 3,9                | -3,3              |                               |                              | FS     |

A partir da Tabela 5-2 é possível perceber que as simulações projetam uma variação média da temperatura diária de 1,5 a 2,0 °C e 4,0 a 5,4 °C para o final do século XXI, nos cenários de emissão SSP1-2.6 e SSP5-8.5 respectivamente. Por outro lado, a variação percentual da precipitação total entre o período histórico e futuro, contempla cenários de incremento e diminuição, no caso dos cenários de incremento é esperada uma variação média de 1,2 a 6,0 % e 2,6 a 2,9 %, nos cenários de emissão SSP1-2.6 e SSP5-8.5, enquanto a diminuição média projetada oscila entre 6,4 - 6,8% e 7,8 -10,6% respectivamente.

Figura 5-1 Simulações que projetam as maiores alterações das condições climáticas médias para o final do século XXI



Na Figura 5 3 é apresentado o conjunto normalizado de  $\Delta T$  e  $\Delta P$

Ao analisar as mudanças da precipitação por cenário de futuro climático, chama a atenção que a magnitude da variação projetada nos futuros: Quente-seco e Frio-Seco, é maior que a projetada nos climas futuros Quente-úmido e Frio-úmido, não obstante, em termos gerais as variações de temperatura e precipitação projetadas para o final do século XXI na RMBH, são coerentes com as projeções de diminuição da precipitação total anual descrita por Iturbide *et al.* (2021), tanto no cenário de emissão SSP1-2.6 quanto no SSP5-8.5.

Ao comparar os incrementos projetados, é possível evidenciar que estes são maiores no cenário de emissão SSP5-8.5, do que no SSP1-2.6, o qual era esperado, visto que como é indicado por Almazroui *et al.* (2021), as variações de temperatura e precipitação se tornam mais significativas quanto maior for a força do cenário de mudança climático, desta forma, os cenários associados ao caminho de desenvolvimento socioeconômico SSP5 projetam maiores alterações que os associados ao caminho de desenvolvimento SSP1.

### **5.1.2 Identificação das mudanças climáticas extremas**

Reconhecidas as simulações que projetam as maiores alterações das condições climáticas médias para o final do século XXI, procurou-se identificar dentre estas, as duas que projetavam as maiores alterações das condições climáticas extremas para o final do século XXI, em cada clima futuro e cenário de emissão.

A identificação foi realizada a partir da variação percentual dos índices: R99PTOT, CDD, WSDI e CSDI do “*Expert team on climate change detection and indices- ETCCDI*”. Na Tabela 5-3, são apresentadas as variações percentuais dos índices, projetadas para o final do século XXI.

**Tabela 5-3 Variação percentual dos índices do ETCCDI entre o período histórico e futuro.**

| SSP1-26        |                  |      |                           |                          | SSP5-85          |                  |      |                           |                          |
|----------------|------------------|------|---------------------------|--------------------------|------------------|------------------|------|---------------------------|--------------------------|
| Simulação      | Índices          |      | Média                     |                          | Simulação        | Índices          |      | Média                     |                          |
| Cenário FS     | CDD              | CSDI | $\overline{\text{CDD}}$   | $\overline{\text{CSDI}}$ | Cenário FS       | CDD              | CSDI | $\overline{\text{CDD}}$   | $\overline{\text{CSDI}}$ |
| EC-Earth3-R109 | 1,1              | 15,8 | 15,6                      | 7,2                      | GFDL-CM4-R1      | 81,1             | 10,6 | 50,5                      | 17,9                     |
| EC-Earth3-R121 | 26,6             | -1,9 |                           |                          | GFDL-ESM4-R1     | 51,0             | 17,8 |                           |                          |
| EC-Earth3-R122 | 25,6             | 16,0 |                           |                          | MPI-ESM1-2-HR-R1 | 35,0             | 20,4 |                           |                          |
| EC-Earth3-R4   | 16,7             | 0,4  |                           |                          | MPI-ESM1-2-HR-R2 | 25,4             | 8,0  |                           |                          |
| INM-CM5-0-R1   | 7,8              | 5,6  |                           |                          | NorESM2-MM-R1    | 60,3             | 32,9 |                           |                          |
| Cenário QS     | CDD              | WSDI | $\overline{\text{CDD}}$   | $\overline{\text{WSDI}}$ | Cenário QS       | CDD              | WSDI | $\overline{\text{CDD}}$   | $\overline{\text{WSDI}}$ |
| EC-Earth3-R110 | 25,6             | -0,9 | 26,4                      | 7,8                      | EC-Earth3-R105   | 66,0             | 1,8  | 61,8                      | 10,8                     |
| EC-Earth3-R114 | 29,7             | 9,0  |                           |                          | EC-Earth3-R122   | 69,7             | 13,1 |                           |                          |
| EC-Earth3-R141 | 26,7             | 22,2 |                           |                          | EC-Earth3-R128   | 44,9             | 16,9 |                           |                          |
| EC-Earth3-R143 | 23,3             | 3,7  |                           |                          | EC-Earth3-R141   | 49,0             | 12,3 |                           |                          |
| EC-Earth3-R148 | 26,6             | 5,2  |                           |                          | EC-Earth3-Veg-R2 | 79,4             | 9,8  |                           |                          |
| Cenário QU     | R99 <sup>1</sup> | WSDI | $\overline{\text{R99}}^1$ | $\overline{\text{WSDI}}$ | Cenário QU       | R99 <sup>1</sup> | WSDI | $\overline{\text{R99}}^1$ | $\overline{\text{WSDI}}$ |
| CMCC-ESM2-R1   | 13,3             | 8,2  | 6,3                       | 8,4                      | CMCC-ESM2-R1     | 32,1             | 5,4  | 16,9                      | 4,8                      |
| EC-Earth3-R11  | 9,3              | 10,6 |                           |                          | EC-Earth3-R11    | 15,7             | 12,5 |                           |                          |
| EC-Earth3-R124 | 4,7              | 5,1  |                           |                          | EC-Earth3-R124   | 11,7             | 3,9  |                           |                          |
| EC-Earth3-R139 | 7,3              | 13,8 |                           |                          | EC-Earth3-R131   | 14,8             | 5,4  |                           |                          |
| EC-Earth3-R144 | -2,9             | 4,4  |                           |                          | EC-Earth3-R149   | 10,2             | -3,3 |                           |                          |
| Cenário FU     | R99 <sup>1</sup> | CSDI | $\overline{\text{R99}}^1$ | $\overline{\text{CSDI}}$ | Cenário FU       | R99 <sup>1</sup> | CSDI | $\overline{\text{R99}}^1$ | $\overline{\text{CSDI}}$ |
| EC-Earth3-R102 | 8,5              | 7,9  | 8,3                       | -1,9                     | EC-Earth3-R109   | 15,3             | 27,1 | 15,0                      | 20,8                     |
| EC-Earth3-R116 | 0,7              | -4,6 |                           |                          | EC-Earth3-R116   | 15,7             | 12,5 |                           |                          |
| EC-Earth3-R126 | 11,0             | 1,5  |                           |                          | EC-Earth3-R138   | 19,7             | 21,2 |                           |                          |
| EC-Earth3-R138 | 6,8              | -8,7 |                           |                          | MRI-ESM2-0-R1    | 21,5             | 10,0 |                           |                          |
| EC-Earth3-R140 | 14,6             | -5,8 |                           |                          | NorESM2-MM-R1    | 2,8              | 32,9 |                           |                          |

(1) Índice R99PTOT

Ao analisar os resultados da Tabela 5-3, percebeu-se que os climas futuros secos apresentam uma maior intensidade do sinal das mudanças, que as dos futuros úmidos, ou seja, em termos gerais para o final do século XXI, as simulações projetam futuros climáticos secos mais extremos que os futuros úmidos.

De modo geral, as simulações projetam uma maior intensidade de condições climáticas secas para o final do século XXI na RMBH, as quais apresentam correlação com as predominâncias de diminuições das precipitações mensais identificadas por Almazroui *et al.* (2021).

Estimados os índices associados a cada futuro climático, avaliou-se cada simulação conforme o apresentado no item 4.3.3, selecionando finalmente as simulações apresentadas na Tabela 5-4, ressaltando que, no apêndice 4 é apresentada de forma detalhada a avaliação realizada.

A variação percentual do índice CDD, na Tabela 5-4 exibe que, sob a ocorrência de climas futuros secos, o número de dias sem precipitação no cenário de emissões SSP1-2.6 poderia se incrementar em média entre 26,1 e 28,2%, e entre 70,7 a 74,55% no cenário de emissões SSP5-8.5, apresentando correlação com as tendências atuais de incremento identificadas por Nunes (2018) para a RMBH.

**Tabela 5-4 Simulações que projetam as maiores alterações das condições climáticas extremas em cada clima futuro.**

| SSP1-26        |                  |      |                           |                          | SSP5-85          |                  |      |                           |                          |
|----------------|------------------|------|---------------------------|--------------------------|------------------|------------------|------|---------------------------|--------------------------|
| Simulação      | Índices          |      | Média                     |                          | Simulação        | Índices          |      | Média                     |                          |
| Cenário FS     | CDD              | CSDI | $\overline{\text{CDD}}$   | $\overline{\text{CSDI}}$ | Cenário FS       | CDD              | CSDI | $\overline{\text{CDD}}$   | $\overline{\text{CSDI}}$ |
| EC-Earth3-R121 | 26,6             | -1,9 | 26,1                      | 7,05                     | GFDL-CM4-R1      | 81,1             | 10,6 | 70,7                      | 21,75                    |
| EC-Earth3-R122 | 25,6             | 16   |                           |                          | NorESM2-MM-R1    | 60,3             | 32,9 |                           |                          |
| Cenário QS     | CDD              | WSDI | $\overline{\text{CDD}}$   | $\overline{\text{WSDI}}$ | Cenário QS       | CDD              | WSDI | $\overline{\text{CDD}}$   | $\overline{\text{WSDI}}$ |
| EC-Earth3-R114 | 29,7             | 9    | 28,2                      | 15,6                     | EC-Earth3-Veg-R2 | 79,4             | 9,8  | 74,55                     | 11,45                    |
| EC-Earth3-R141 | 26,7             | 22,2 |                           |                          | EC-Earth3-R122   | 69,7             | 13,1 |                           |                          |
| Cenário QU     | R99 <sup>1</sup> | WSDI | $\overline{\text{R99}}^1$ | $\overline{\text{WSDI}}$ | Cenário QU       | R99 <sup>1</sup> | WSDI | $\overline{\text{R99}}^1$ | $\overline{\text{WSDI}}$ |
| CMCC-ESM2-R1   | 13,3             | 8,2  | 11,3                      | 9,4                      | CMCC-ESM2-R1     | 32,1             | 5,4  | 23,9                      | 8,95                     |
| EC-Earth3-R11  | 9,3              | 10,6 |                           |                          | EC-Earth3-R11    | 15,7             | 12,5 |                           |                          |
| Cenário FU     | R99 <sup>1</sup> | CSDI | $\overline{\text{R99}}^1$ | $\overline{\text{CSDI}}$ | Cenário FU       | R99 <sup>1</sup> | CSDI | $\overline{\text{R99}}^1$ | $\overline{\text{CSDI}}$ |
| EC-Earth3-R102 | 8,5              | 7,9  | 9,75                      | 4,7                      | EC-Earth3-R138   | 19,7             | 21,2 | 20,6                      | 15,6                     |
| EC-Earth3-R126 | 11               | 1,5  |                           |                          | MRI-ESM2-0-R1    | 21,5             | 10   |                           |                          |

(1) Índice R99PTOT

Por outra parte, a variação média do índice R99PTOT na Tabela 5-4 mostra que, sob a ocorrência de climas futuros úmidos, as precipitações extremas iriam se incrementar mais no cenário de emissão SSP5-8.5, que no cenário de emissões SSP1-2.6.

De outro lado, a variação percentual do índice WSDI exibe que, o número de dias com altas temperaturas poderiam se incrementar entre 9,4 e 15,6%, nos futuros climáticos quentes do cenário de emissão SSP1-2.6, e entre 8,95 e 11,45% nos futuros quentes do cenário de emissão SSP5-8.5, já nos futuros frios, a variação percentual do índice CSDI exibe que, o incremento do número de dias com temperaturas baixas pode-se incrementar entre um 4,7 e um 7,05%, no cenário de emissão SSP1-2.6, e entre um 15,6 e 21,75% no cenário de emissão SSP5-8.5.

Finalmente, foi evidenciado que a magnitude da variação percentual das condições extremas de precipitação nos futuros Quente-seco e Frio-Seco, é maior que a projetada nos climas futuros Quente-úmido e Frio-úmido, apresentando assim, correlação com os resultados obtidos na etapa 5.1.1.

### 5.1.3 Avaliação da capacidade de representação do clima histórico

Uma vez identificadas as duas simulações que projetam as maiores alterações das condições climáticas médias e extremas para o final do século XXI, foi avaliada sua capacidade de reproduzir as condições pluviométricas históricas a nível diário.

É importante ressaltar que, a avaliação da capacidade de reprodução das condições de temperatura não foi verificada por dois motivos: i) A baixa densidade de estações climatológicas presentes na RMBH; ii) Nas seguintes etapas unicamente serão empregadas as simulações de precipitação, uma vez que, o trabalho visa em identificar as alterações nas frequências de ocorrência das precipitações diárias máximas por ano hidrológico, sob a ocorrência dos cenários emissão SSP1-2.6 e SSP5-8.5.

A avaliação foi realizada para as oito simulações selecionadas previamente na etapa 5.3.2, conforme as diretrizes apresentadas no item 4.3.4. Na Tabela 5-5 são apresentados os resultados obtidos, ressaltando que, no apêndice 5 é apresentada a avaliação detalhada.

**Tabela 5-5 Métricas de erro médias da capacidade de representação do clima histórico**

| SSP1-2.6        |                         |               |      | SSP5-8.5         |                         |               |      |
|-----------------|-------------------------|---------------|------|------------------|-------------------------|---------------|------|
| Simulação       | Métricas de Erro Médias |               |      | Simulação        | Métricas de erro médias |               |      |
| Clima           | NSE                     | RMSE (mm/dia) | KGE  | Clima            | NSE                     | RMSE (mm/dia) | KGE  |
| <b>Clima FS</b> |                         |               |      | <b>Clima FS</b>  |                         |               |      |
| EC-Earth3-R121  | -0,31                   | 12,39         | 0,07 | GFDL-CM4-R1      | -0,86                   | 4,02          | 0,54 |
| EC-Earth3-R122  | -0,25                   | 12,14         | 0,10 | NorESM2-MM-R1    | -0,12                   | 3,15          | 0,55 |
| <b>Clima QS</b> |                         |               |      | <b>Clima QS</b>  |                         |               |      |
| EC-Earth3-R114  | -0,24                   | 12,06         | 0,07 | EC-Earth3-Veg-R2 | -0,08                   | 3,13          | 0,43 |
| EC-Earth3-R141  | -0,27                   | 12,19         | 0,07 | EC-Earth3-R122   | -0,10                   | 3,15          | 0,39 |
| <b>Clima QU</b> |                         |               |      | <b>Clima QU</b>  |                         |               |      |
| CMCC-ESM2-R1    | -0,14                   | 11,56         | 0,04 | CMCC-ESM2-R1     | -0,02                   | 3,05          | 0,52 |
| EC-Earth3-R11   | -0,23                   | 12,02         | 0,09 | EC-Earth3-R11    | -0,04                   | 3,07          | 0,42 |

| SSP1-2.6        |                         |               |      | SSP5-8.5        |                         |               |      |
|-----------------|-------------------------|---------------|------|-----------------|-------------------------|---------------|------|
| Simulação       | Métricas de Erro Médias |               |      | Simulação       | Métricas de erro médias |               |      |
| Clima           | NSE                     | RMSE (mm/dia) | KGE  | Clima           | NSE                     | RMSE (mm/dia) | KGE  |
| <b>Clima FU</b> |                         |               |      | <b>Clima FU</b> |                         |               |      |
| EC-Earth3-R102  | -0,23                   | 12,02         | 0,08 | EC-Earth3-R138  | -0,11                   | 3,15          | 0,42 |
| EC-Earth3-R126  | -0,23                   | 12,00         | 0,09 | MRI-ESM2-0-R1   | -0,25                   | 3,35          | 0,49 |

**Nota:** As métricas de erro foram estimadas a partir dos registros diários observados e simulados no período histórico

Ao analisar as métricas de erro apresentadas na Tabela 5-5, é possível afirmar que as precipitações diárias simuladas apresentam um baixo grau de correlação com as precipitações observadas, o qual explica os baixos NSE e KGE, e os altos RMSE.

Era esperado que as métricas de erro exibissem um baixo grau de correlação entre as precipitações diárias simuladas e observadas na escala diária, visto que, ainda não tinha sido aplicada nenhuma técnica de *Downscaling* às séries simuladas.

Avaliada a capacidade de reprodução das condições pluviométricas históricas, procedeu-se a seleção das simulações que serão empregadas no desenvolvimento do estudo, para o qual, identificou-se em cada futuro climático a simulação cujas métricas de erro apresentavam a melhor performance, selecionando finalmente as simulações da Tabela 5-6.

**Tabela 5-6 Simulações de maior representatividade para a RMBH em cada cenário de emissão.**

| Simulação | Clima Futuro | Cenário emissão SSP1-26 | Clima Futuro | Cenário emissão SSP5-8.5 |
|-----------|--------------|-------------------------|--------------|--------------------------|
| 1         | Clima QU     | CMCC-ESM2-R1            | Clima QU     | CMCC-ESM2-R1             |
| 2         | Clima QS     | EC-Earth3-R114          | Clima FU     | EC-Earth3-R138           |
| 3         | Clima FS     | EC-Earth3-R122          | Clima QS     | EC-Earth3-Veg-R2         |
| 4         | Clima FU     | EC-Earth3-R126          | Clima FS     | NorESM2-MM-R1            |

## 5.2 Aplicação e avaliação das técnicas de *Downscaling*

As técnicas de *Downscaling* foram aplicadas inicialmente às simulações diárias de precipitação do período histórico (1970-2014), com o propósito de identificar e selecionar a técnica de maior representatividade para os objetivos do estudo. Uma vez identificada a técnica mais representativa, procedeu-se a aplicá-la nas séries de precipitações futuras. A seguir, são apresentados os resultados obtidos.

### 5.2.1 *Downscaling* do período histórico 1970-2014

Como foi mencionado no item 4.4, a avaliação das técnicas de *Downscaling* foi realizada a partir da comparação do número de dias chuvosos, da precipitação total anual por ano hidrológico e das frequências de ocorrência das PDMA, estimadas tanto com as séries obtidas após a aplicação do *Downscaling*, quanto com as observadas.

As técnicas de *Downscaling* foram aplicadas conforme os procedimentos descritos no item 3.3, tanto às simulações selecionadas no cenário de emissão SSP1-2.6, quanto nas selecionadas no SSP5-8.5. A partir das séries pluviométricas de *Downscaling* de cada simulação, foram estimados para cada ano hidrológico: o número de dias chuvosos, a precipitação total por ano hidrológico, e as séries de PDMA. Em seguida, procedeu-se a comparação destes valores com os obtidos a partir dos registros históricos, por meio das métricas de erro descritas na seção 3.6. A seguir, são apresentados os resultados obtidos:

- **Número de dias chuvosos e precipitação total por ano hidrológico:**

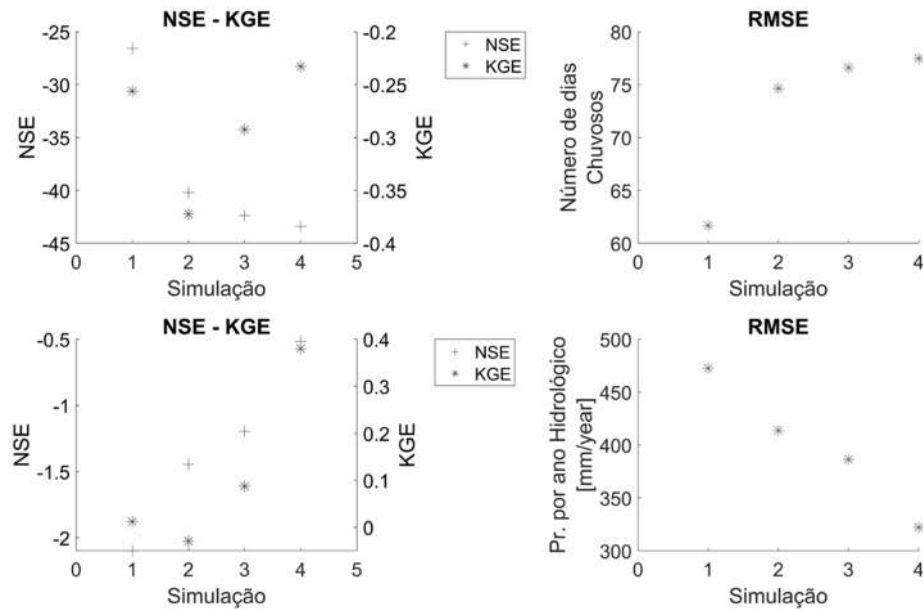
A partir dos resultados apresentados da Figura 5-2 à Figura 5-11, é possível perceber que, desenvolver um *Downscaling* na escala diária com as precipitações observadas e simuladas, e empregando alguma das técnicas de redução de escala aqui apresentadas, não garante a obtenção de uma correlação temporal entre as magnitudes dos registros observados e simulados, o que conduz tanto a superestimções quanto a subestimções, da precipitação total e do número de dias chuvosos do ano hidrológico.

Analisando as métricas de erro por cenário de emissão e técnica de *Downscaling*, foi percebido que a implementação do método Delta como técnica de *Downscaling* não diminui as discrepâncias entre o número de dias chuvosos observados e simulados, o que explica porque a Figura 5-2 e Figura 5-4 apresentam métricas de erro próximas, quando se considera o número de dias chuvosos no ano hidrológico. Por outro lado, percebeu-se que implementar técnicas de *Downscaling* baseadas em QQ, AR, e PG, melhora a acurácia de predição do número de dias chuvosos.

No entanto, percebeu-se que a implementação do método Delta como técnica de *Downscaling* diminui levemente as discrepâncias entre a precipitação total por ano hidrológico observada e simulada, enquanto a implementação das técnicas baseadas em QQ, AR e PG as incrementam.

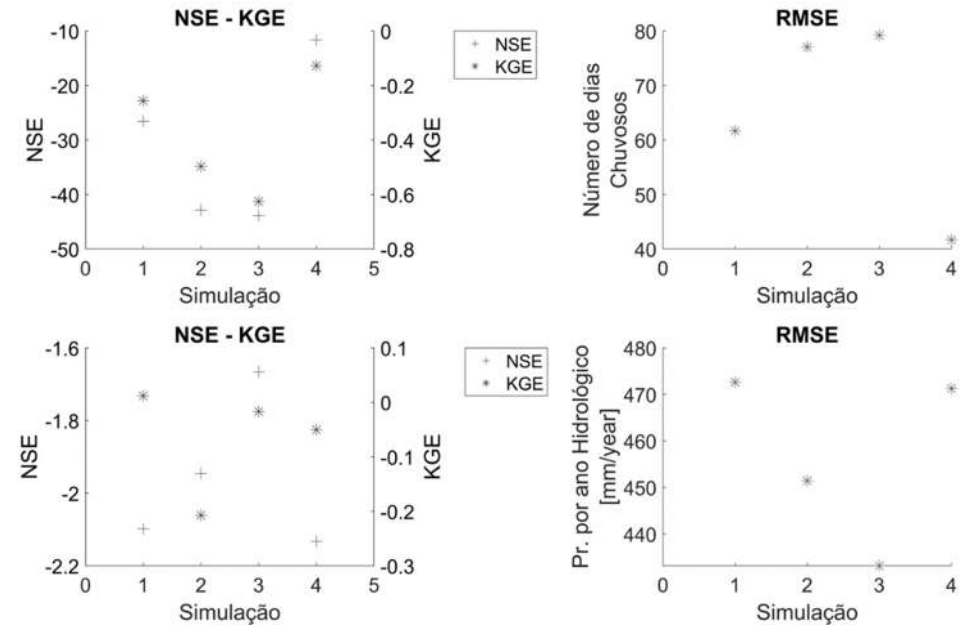
A partir das observações anteriores e conforme o apresentado por Nover *et al.* (2016), se evidencia que a redução de escala é uma das principais fontes de incertezas nos estudos que visam identificar alterações das condições climáticas futuras. Deste modo, é imprescindível avaliar diversas técnicas e enfoques de *Downscaling*, visto que como foi evidenciado anteriormente, o desempenho destas varia segundo a análise a ser desenvolvida.

**Figura 5-2 Métricas de erro médias da precipitação total por ano hidrológico e número de dias chuvosos – Sem Downscaling Cenário SSP1-2.6**

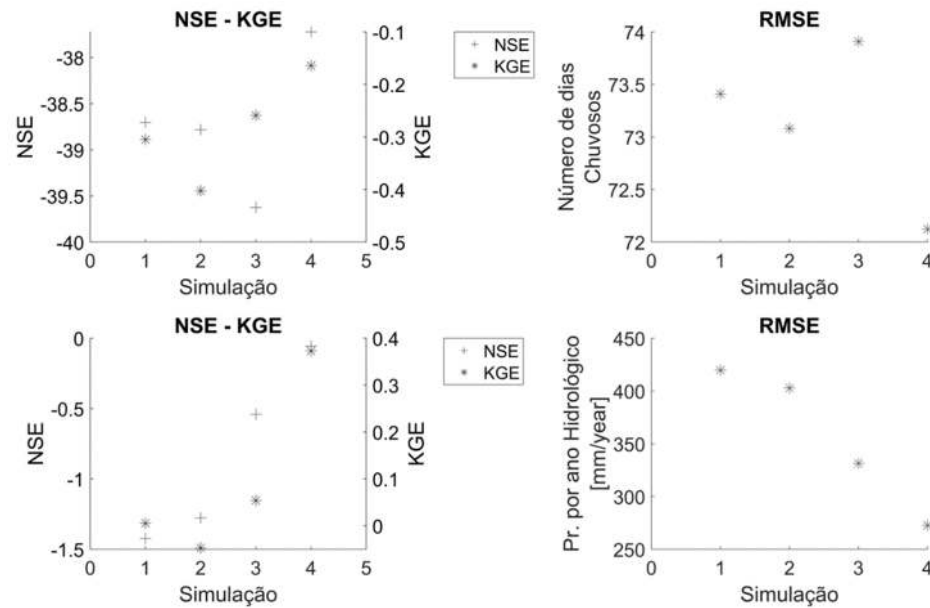


**Nota:** As simulações correspondem as apresentadas na Tabela 5-6

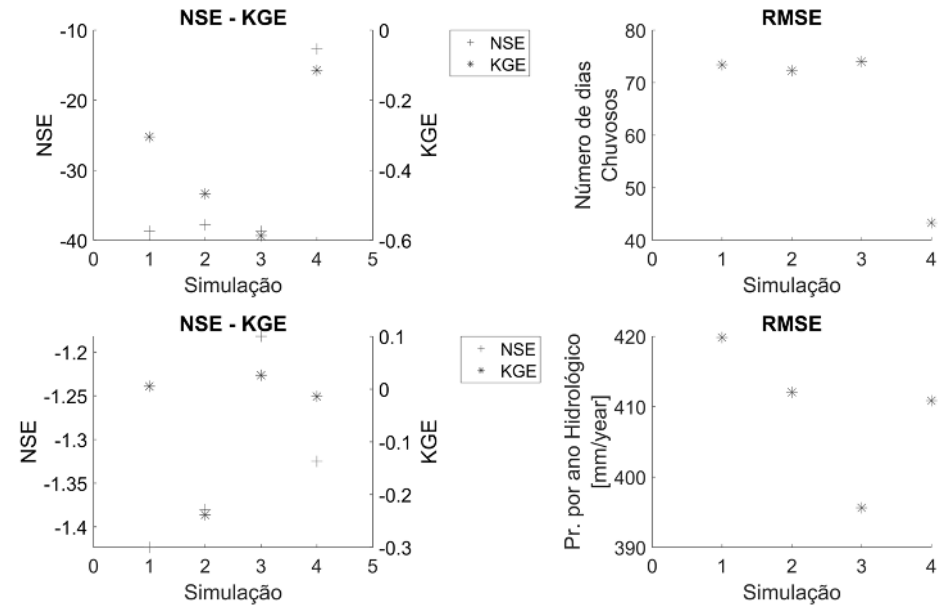
**Figura 5-3 - Métricas de erro médias da precipitação total por ano hidrológico e número de dias chuvosos – Sem Downscaling Cenário SSP5-8.5**



**Figura 5-4 Métricas de erro médias da precipitação total por ano hidrológico e número de dias chuvosos – Método Delta Cenário SSP1-2.6**

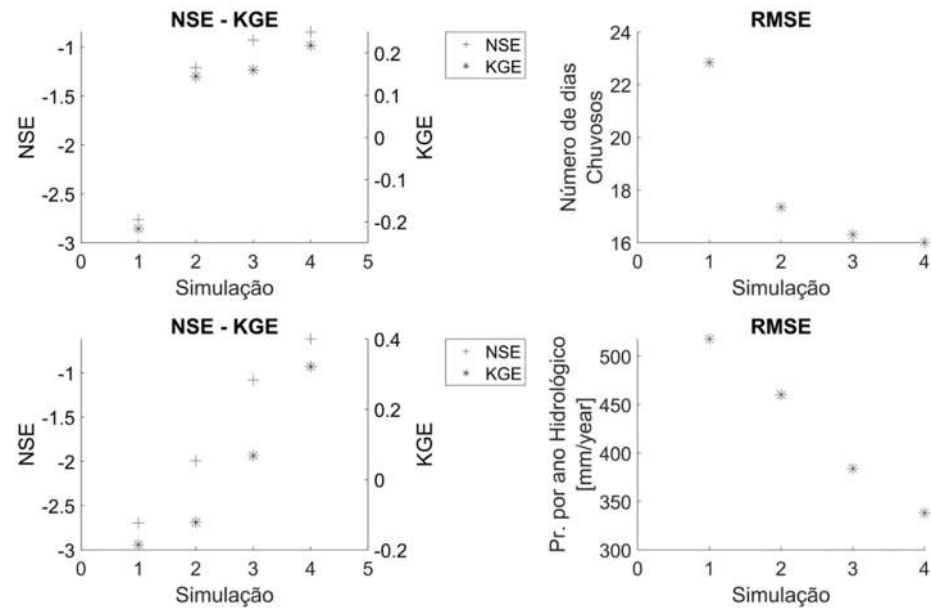


**Figura 5-5 - Métricas de erro médias da precipitação total por ano hidrológico e número de dias chuvosos – Método Delta Cenário SSP5-8.5**



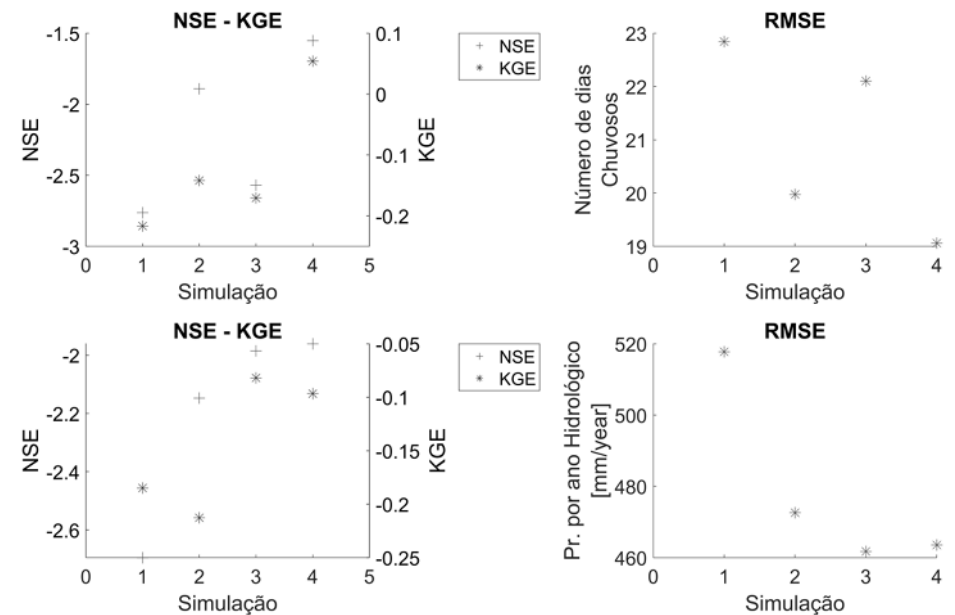
**Nota:** As simulações correspondem as apresentadas na Tabela 5-6

**Figura 5-6 Métricas de erro médias da precipitação total por ano hidrológico e número de dias chuvosos – QQ Cenário SSP1-2.6**

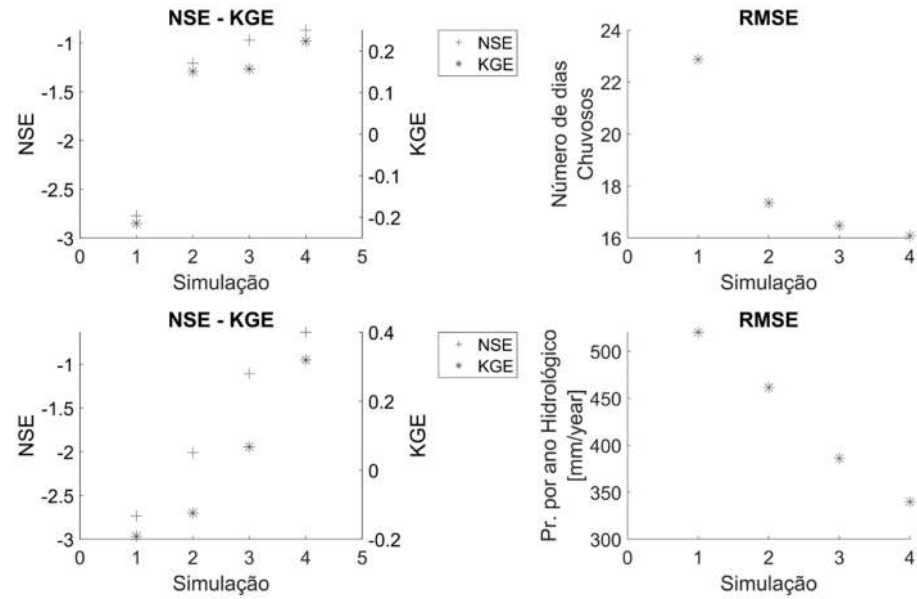


**Nota:** As simulações correspondem as apresentadas na Tabela 5-6

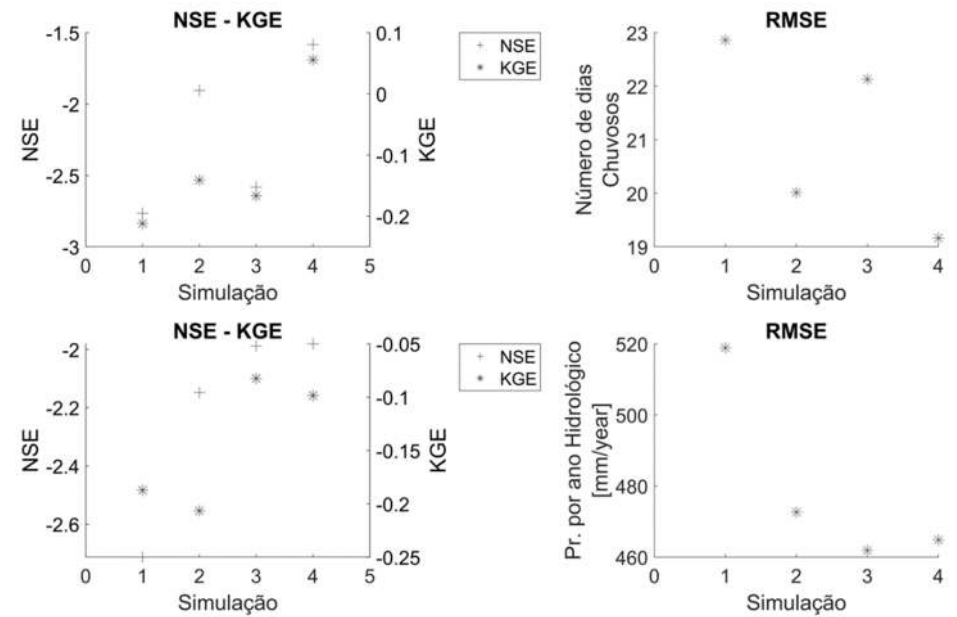
**Figura 5-7 - Métricas de erro médias da precipitação total por ano hidrológico e número de dias chuvosos – QQ Cenário SSP1-8.5**



**Figura 5-8 - Métricas de erro médias da precipitação total por ano hidrológico e número de dias chuvosos – AR Cenário SSP1-2.6**

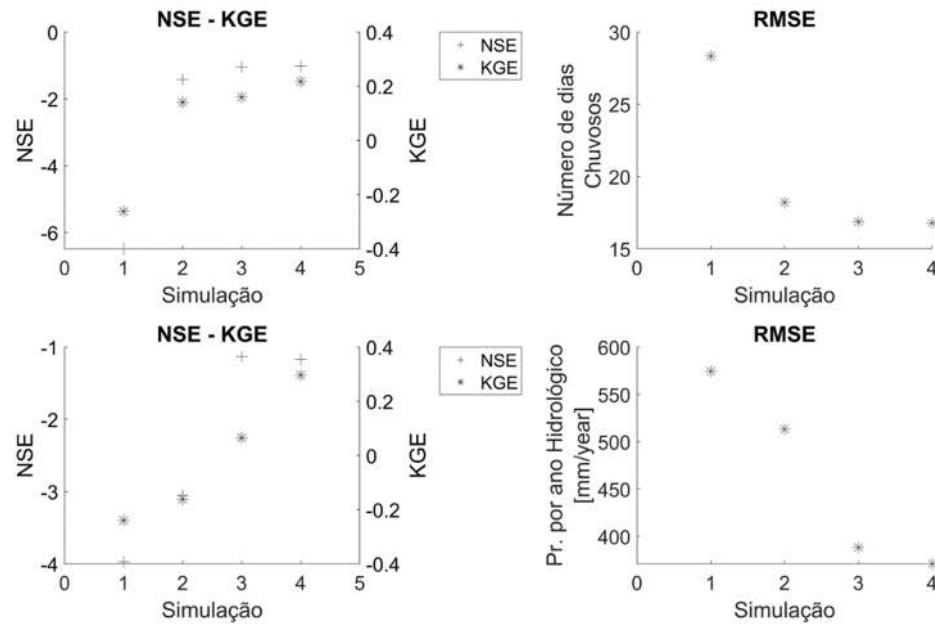


**Figura 5-9 - Métricas de erro médias da precipitação total por ano hidrológico e número de dias chuvosos – AR Cenário SSP5-8.5**

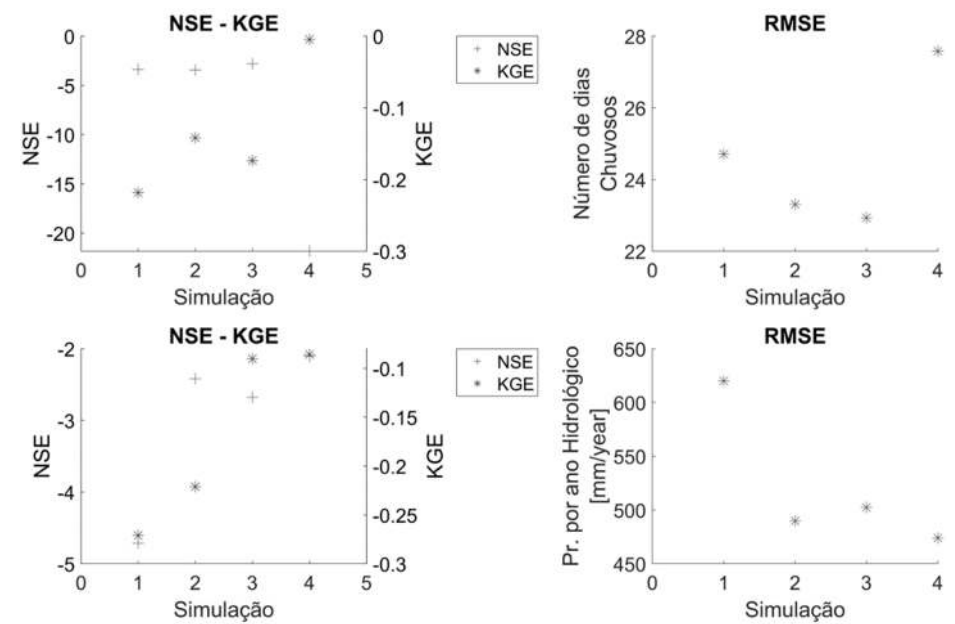


**Nota:** As simulações correspondem as apresentadas na Tabela 5-6

**Figura 5-10 - Métricas de erro médias da precipitação total por ano hidrológico e número de dias chuvosos – PG Cenário SSP1-2.6**



**Figura 5-11 - Métricas de erro médias da precipitação total por ano hidrológico e número de dias chuvosos – PG Cenário SSP5-8.5**



**Nota:** As simulações correspondem as apresentadas na Tabela 5-6

- **Frequências de ocorrência das PDMA:**

Efetuada a redução de escala, desenvolveu-se as respectivas análises de frequência de cada estação pluviométrica, a partir das PDMA observadas e simuladas. As PDMA simuladas foram extraídas das precipitações diárias obtidas no processo de *Downscaling*, desta forma, para cada estação foram obtidas quatro séries de PDMA simuladas (uma por cada técnica de *Downscaling*). Na análise, foram considerados os tempos de retorno de 2, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95 e 100 anos.

Por meio do NSE, RMSE e KGE, foi realizada a avaliação dos resultados da análise de frequência, deste modo, foram comparados os Quantis associados aos diferentes tempos de retorno estimados a partir das PDMA observadas e simuladas. A seguir, da Figura 5-12 à Figura 5-19, são apresentadas as métricas de erro médias obtidas, ressaltando que, as métricas de erro de cada estação são apresentadas no apêndice 5

Ao analisar as métricas de erro médias, é possível perceber que, quando são empregadas as técnicas de redução de escala baseadas em QQ, PG e AR, os Quantis estimados com as PDMA simuladas, apresentam boa correlação com os estimados a partir das PDMA observadas, o qual se expressa em baixos RMSE e altos NSE e KGE.

Executando a redução de escala percebeu-se que, as técnicas baseadas em PG são as mais custosas computacionalmente, porém, apresentam a vantagem de retornar uma expressão matemática que descreve as relações existentes entre a precipitação diária simulada pelo MCG e a observada no posto de monitoramento.

Por outra parte, evidenciou-se que na RMBH não é prudente desenvolver análises de frequência a partir das PDMA do método Delta, visto que, as métricas de erro evidenciam uma péssima correlação com os Quantis estimados a partir dos registros simulados.

Baseados nas análises de frequência desenvolvidas e das métricas de erro médias, percebeu-se que, a técnica de redução de escala baseada em AR, é a que permite obter as séries de PDMA simuladas mais próximas das observadas, seguidas das baseadas em PG e QQ.

Ao comparar as métricas de erro médias em cada cenário de emissão e em cada clima futuro, foi possível perceber que, as simulações que apresentam os melhores rendimentos variam com

o cenário de emissão e com a técnica de *Downscaling* empregada. Por exemplo, no caso do método Delta no cenário de emissões SSP1-2.6, as simulações que apresentaram o melhor e pior desempenho, foram as associadas aos futuros climáticos Quente-Úmido e Frio-Seco, enquanto no caso da redução de escala baseada em AR, o melhor e pior desempenho se apresentou respectivamente, nas simulações associadas aos futuros climáticos Frio-Seco e Quente-Úmido.

Deste modo, se evidencia a necessidade de escolher uma técnica de redução de escala de acordo com os objetivos da pesquisa, visto que, como é indicado por Taye e Willems (2013) uma eleição inadequada pode levar a compreensões equivocadas.

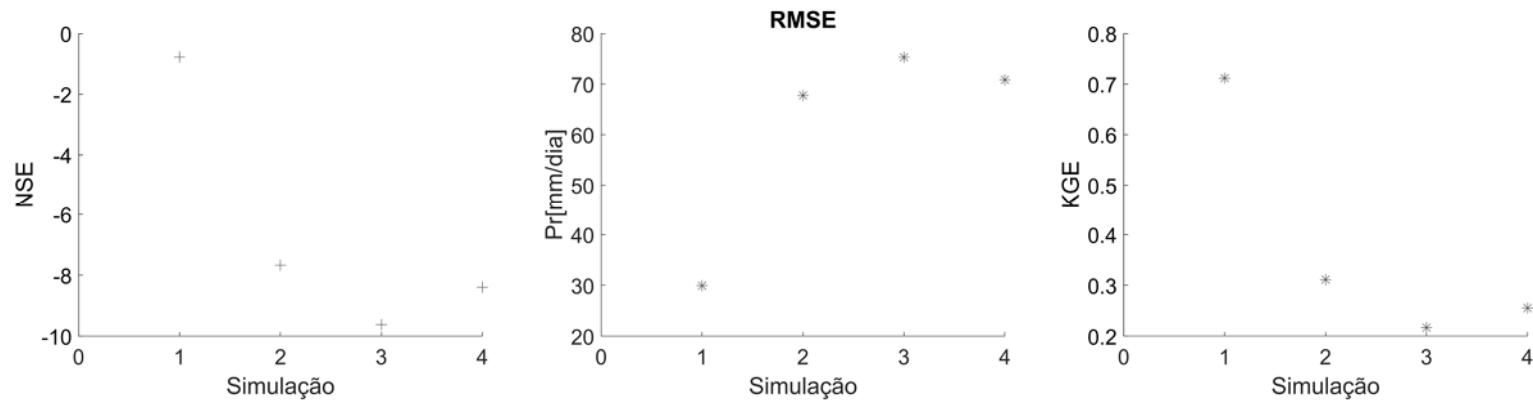
Por outra parte, ao analisar de forma geral os resultados da análise de frequência, se percebe que, os métodos de redução de escala Delta e QQ, geram as maiores subestimações dos Quantis associados aos diferentes tempos de retorno, tanto no cenário SSP1-2.6, quanto no SSP5-8.5 (ver Figura 5-20 e Figura 5-21), enquanto que, os métodos baseados em PG e AR são os que permitem obter as menores subestimações.

Assim mesmo, observou-se que na análise de frequência desenvolvida a partir das PDMA simuladas pela PG, se projetou uma alta quantidade de Quantis atípicos em todos os tempos de retorno, o qual indica que, nem sempre a redução de escala baseada neste método consegue capturar adequadamente as relações entre as precipitações simuladas pelos MCG e as observadas nos postos de monitoramento.

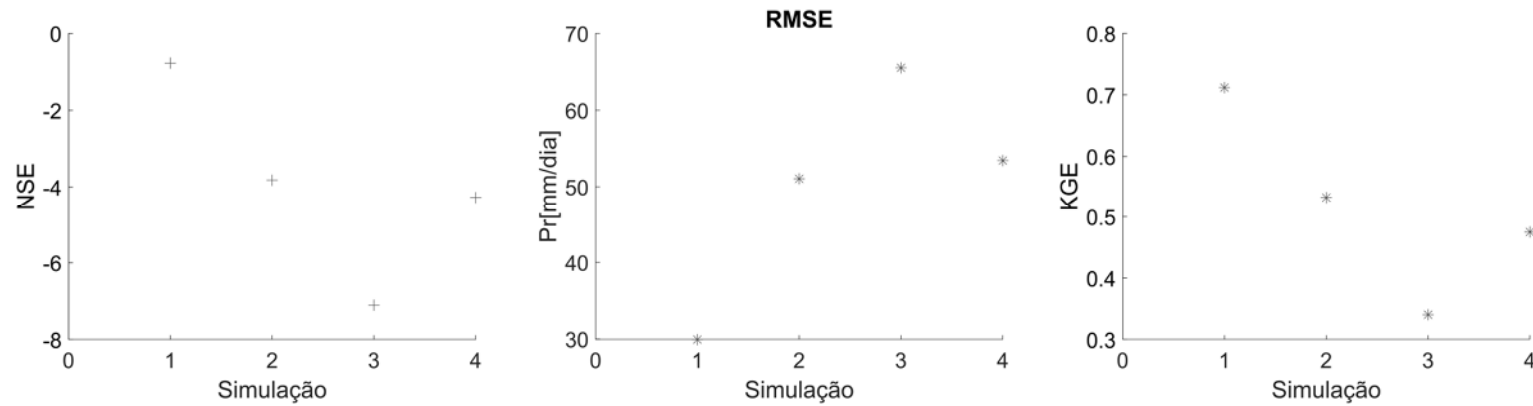
Diante do exposto, é possível afirmar que, na RMBH a redução de escala baseada em AR é a melhor opção para o desenvolvimento de estudos que visem em identificar alterações na frequência de ocorrência das precipitações máximas diárias num contexto de mudanças climáticas. No caso dos estudos que visem identificar alterações tanto do número de dias chuvosos como da precipitação total por ano hidrológico deverão ser analisados enfoques de redução de escala diferentes aos apresentados no presente trabalho.

Conforme o anterior, a redução de escala das precipitações diárias simuladas pelos MCG foi realizada a partir de técnicas baseada em AR, visto que, como foi apresentada anteriormente, resultou ser a mais adequada para os objetivos do trabalho.

**Figura 5-12** – Métricas de erro médias da análise de frequência, cenário de emissão SSP1-2.6, técnica de Downscaling Método Delta.

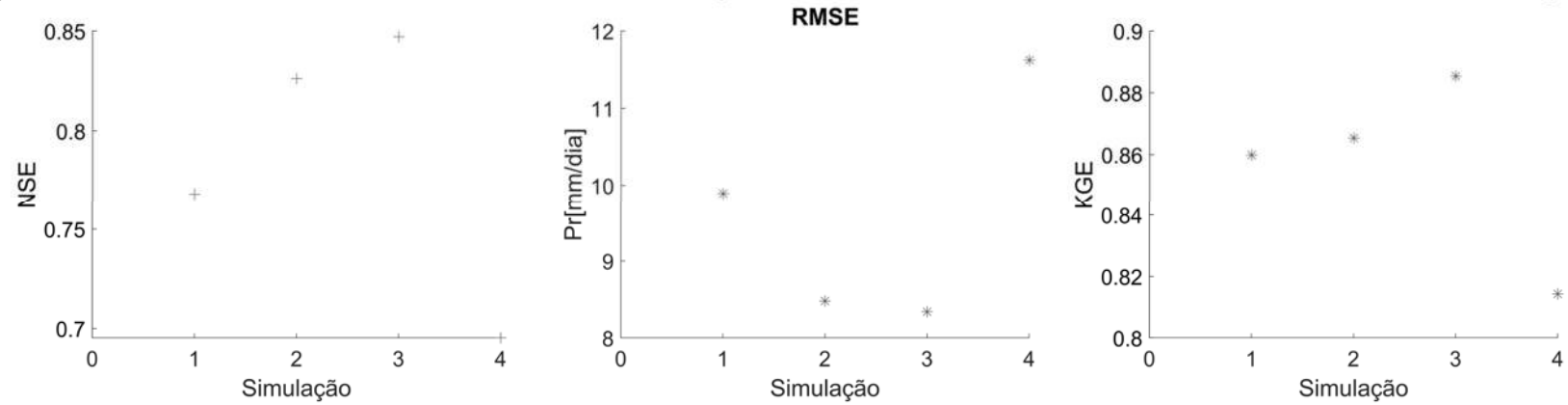


**Figura 5-13** – Métricas de erro médias da análise de frequência, cenário de emissão SSP5-8.5, técnica de Downscaling Delta.

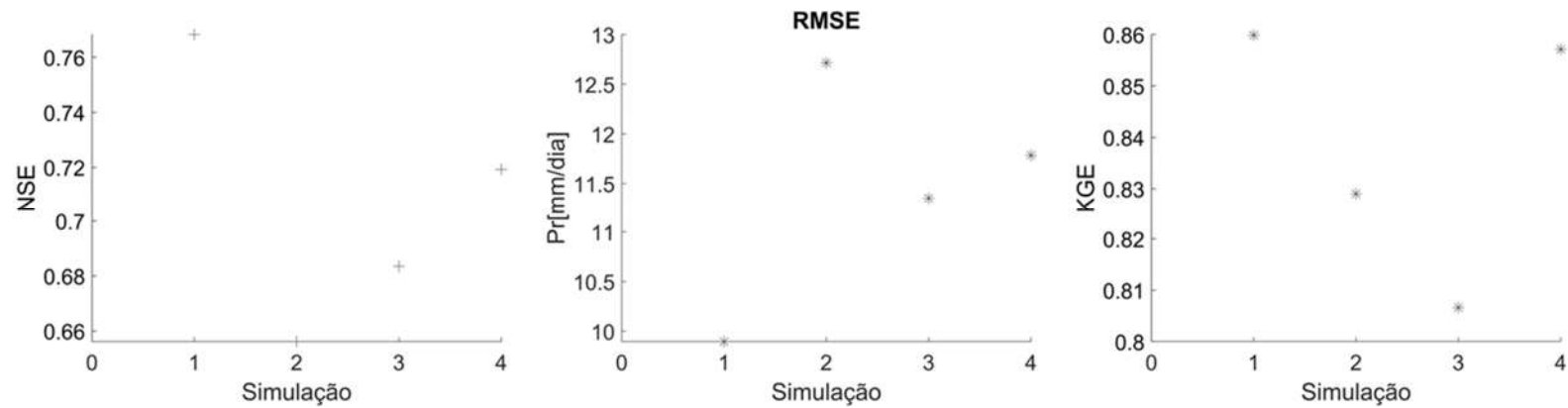


**Nota:** As simulações correspondem as apresentadas na Tabela 5-6

**Figura 5-14 – Métricas de erro médias da análise de frequência, cenário de emissão SSP1-2.6, técnica de Downscaling QQ.**

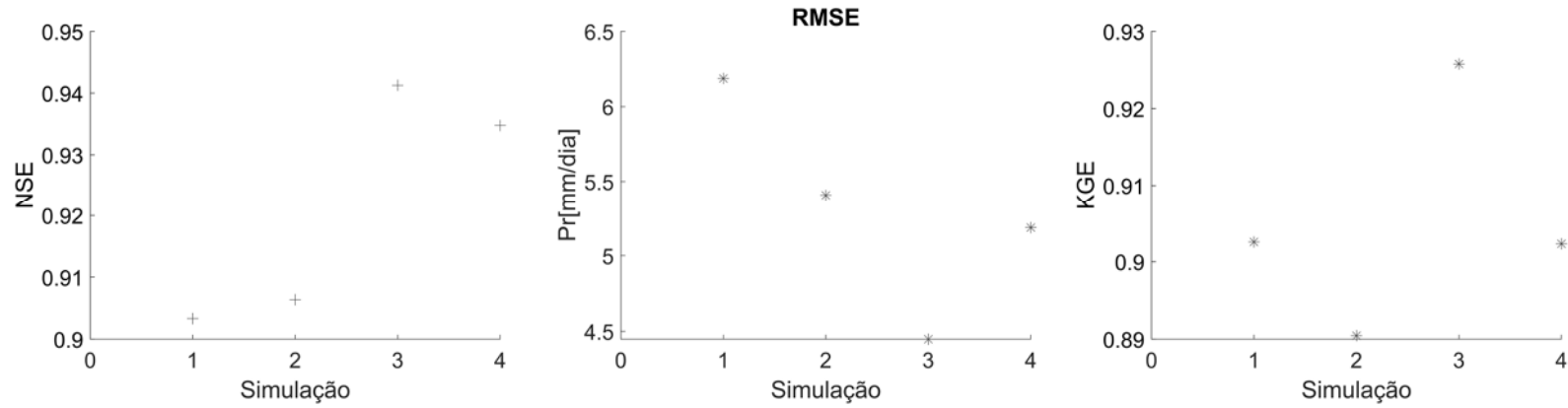


**Figura 5-15 – Métricas de erro médias da análise de frequência, cenário de emissão SSP5-8.5, técnica de Downscaling QQ.**

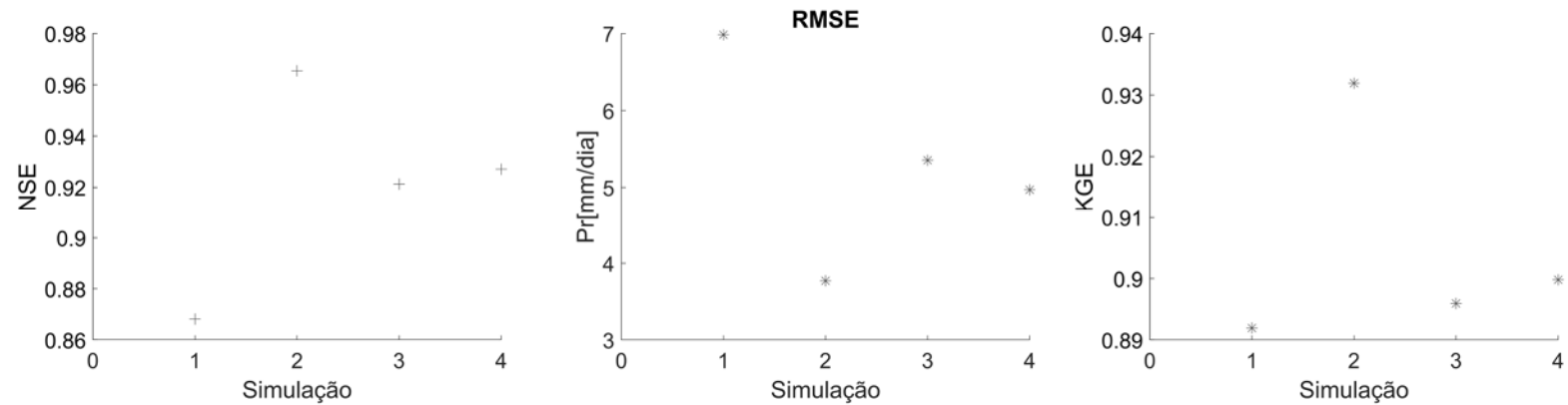


**Nota:** As simulações correspondem as apresentadas na Tabela 5-6

**Figura 5-16 – Métricas de erro médias da análise de frequência, cenário de emissão SSP1-2.6, técnica de Downscaling AR.**

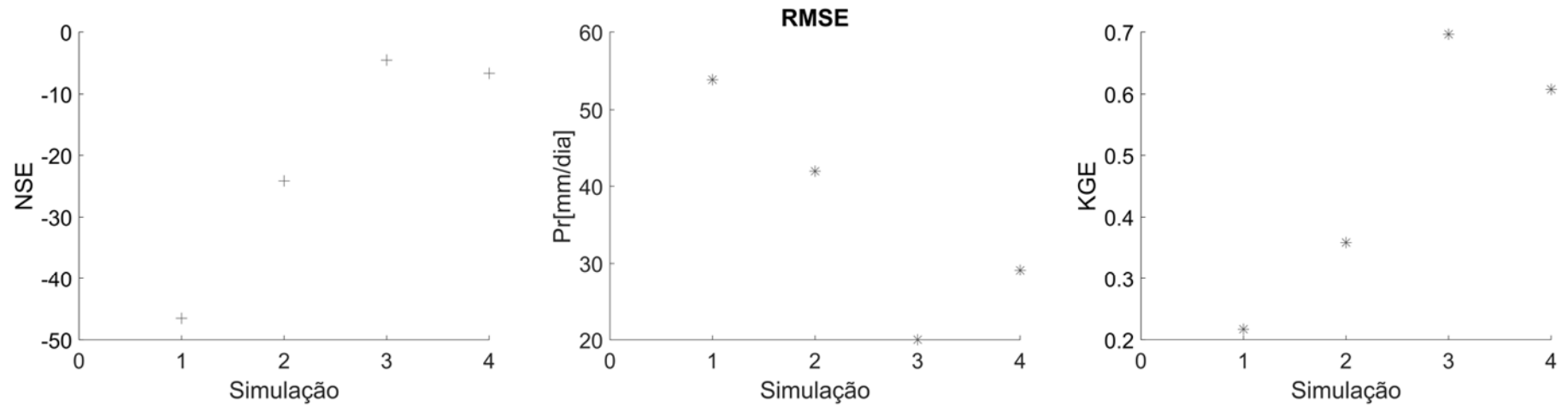


**Figura 5-17 – Métricas de erro médias da análise de frequência, cenário de emissão SSP5-8.5, técnica de Downscaling AR.**

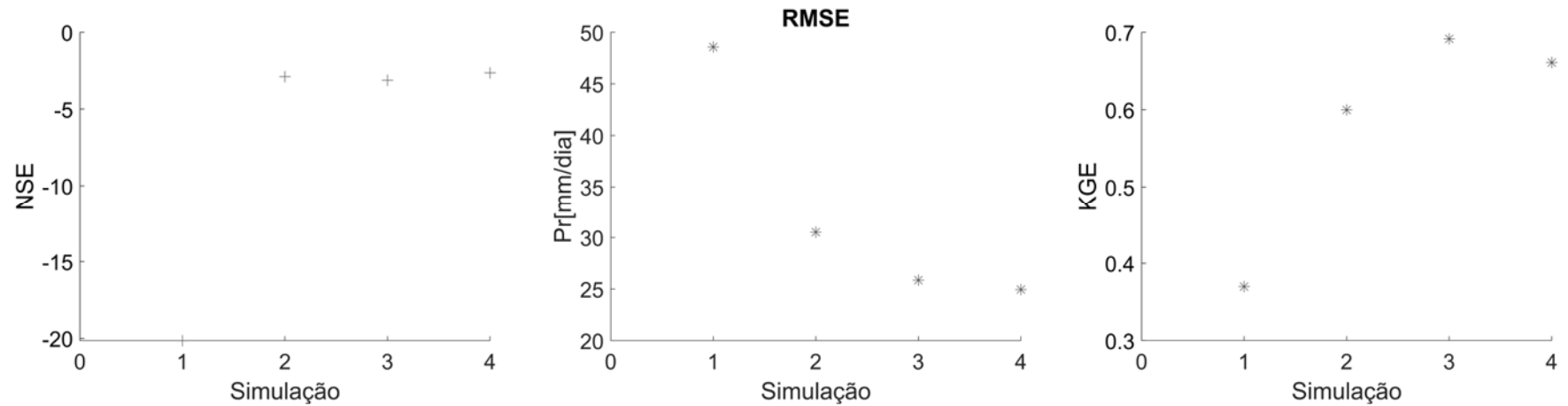


**Nota:** As simulações correspondem as apresentadas na Tabela 5-6

**Figura 5-18 – Métricas de erro médias da análise de frequência, cenário de emissão SSP1-2.6, técnica de Downscaling PG.**



**Figura 5-19 – Métricas de erro médias da análise de frequência, cenário de emissão SSP5-8.5, técnica de Downscaling PG.**



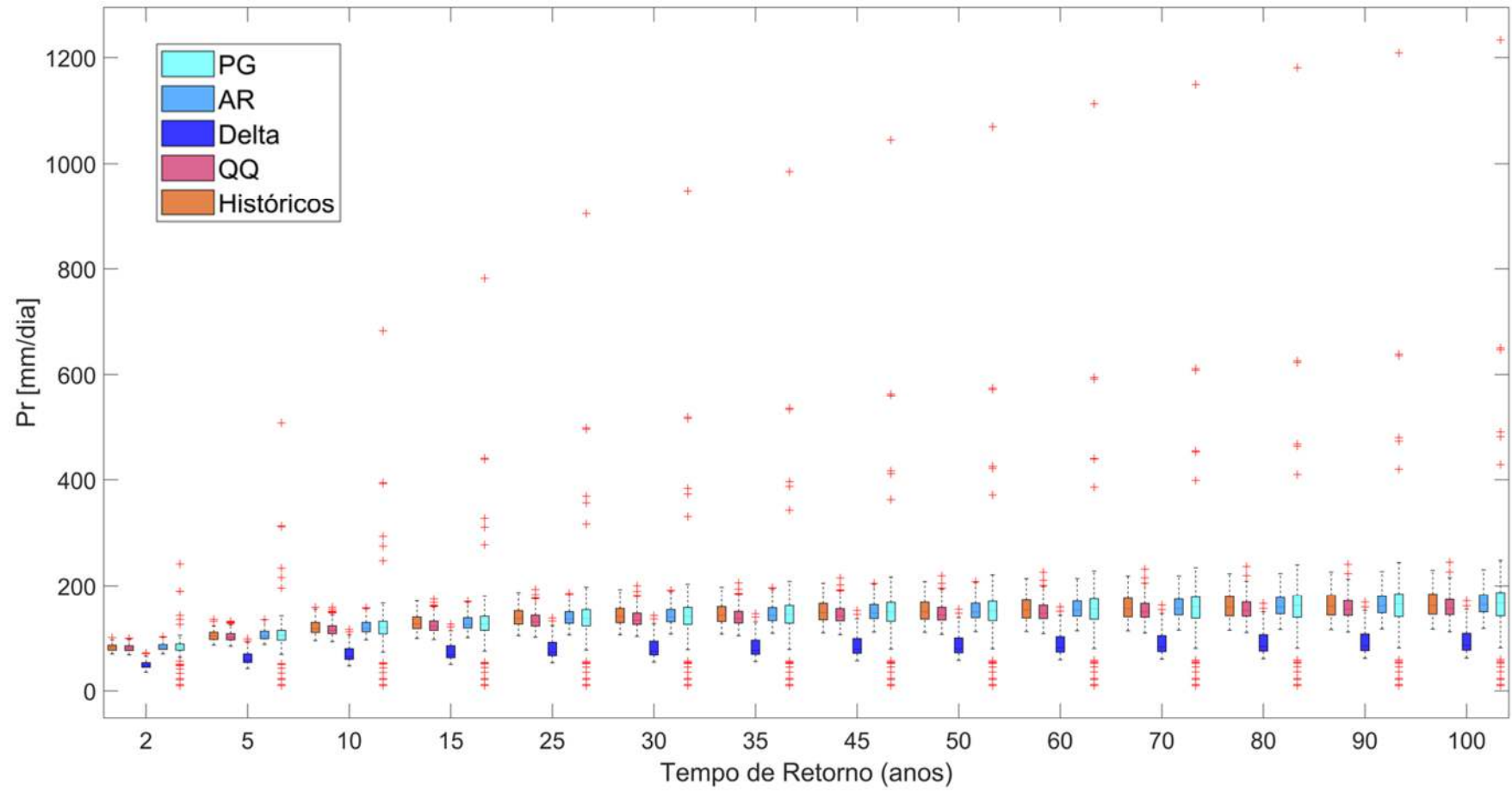
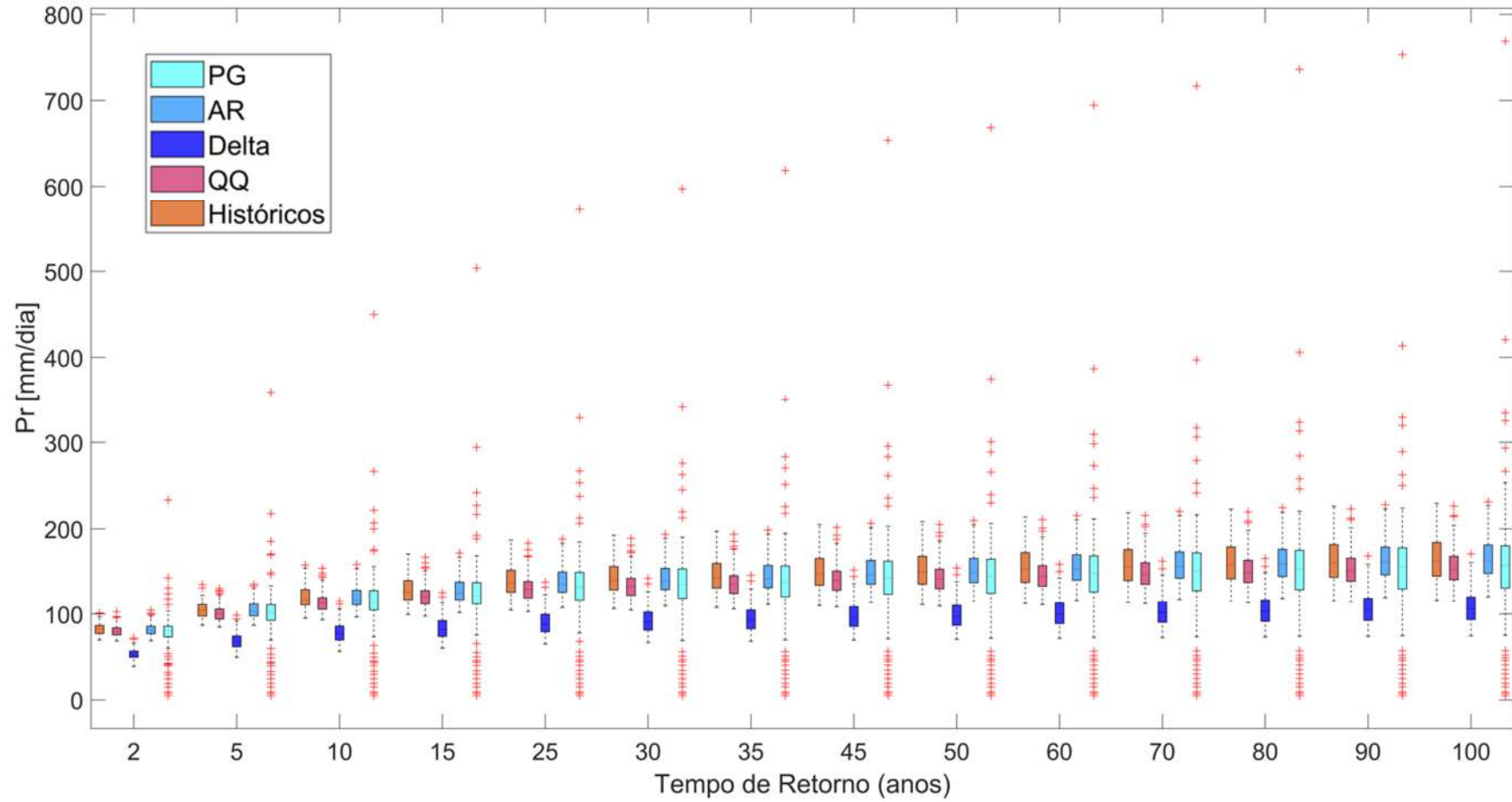
**Figura 5-20 – Boxplot da frequência de ocorrência das PDMA observadas e simuladas no cenário de emissões SSP1-2.6**

Figura 5-21 – Boxplot da frequência de ocorrência das PDMA observadas e simuladas no cenário de emissões SSP5-8.5



### 5.2.2 *Downscaling* do período Futuro 2015-2100

O *Downscaling* das séries futuras foi realizado a partir de técnicas baseadas em AR, e empregando as precipitações observadas e simuladas. Deste modo, identificou-se o pixel no qual se encontrava inserida cada estação pluviométrica, em seguida, realizou-se a extração e *Downscaling* das precipitações simuladas para o período futuro 2015-2100. As séries futuras de cada estação foram disponibilizadas em: <https://drive.google.com/drive/folders/1NXzQ5OWV0Sp29FRLb06TFETOi35Xec7P?usp=sharing>

### 5.3 *Análise de frequência das PDMA observadas e simuladas.*

Executada a redução de escala, desenvolveu-se as análises de frequência do período histórico e futuro, a partir das PDMA observadas e simuladas. As PDMA observadas foram calculadas das precipitações diárias registradas no período histórico, enquanto as PDMA futuras, foram extraídas das precipitações diárias obtidas no processo de *Downscaling*.

#### 5.3.1 *Análise de frequência do período histórico*

Estimadas as séries de PDMA históricas, procedeu-se a verificação da estacionariedade, independência e homogeneidade destas, por meio dos testes estatísticos de Spearman, Wald-Wolfowitz e Mann-Whitney.

As hipóteses nulas de homogeneidade, estacionariedade e aleatoriedade foram aceitas em 29, 31 e 28 estações respectivamente. Identificado que, nem em todas as estações foi possível aceitar as hipóteses nula, optou-se por desenvolver o estudo a partir das 29 estações que atenderam as hipóteses de homogeneidade e estacionariedade. As séries que tiveram a hipótese nula de independência rejeitada não foram desconsideradas, visto que, o modo de geração das séries de PDMA garantia séries independência.

O teste de Kolmogorov Smirnov foi aplicado com um nível de significância do 2%, com o propósito de identificar a aderência das séries de PDMA às funções de probabilidade contempladas. Os resultados evidenciaram que 83%, 7% e 10% das séries avaliadas se ajustam às funções de probabilidade Gumbel, Gamma e Log-Normal respectivamente.

Identificadas as funções de probabilidade a serem ajustadas em cada estação, estimou-se os parâmetros de cada uma delas por meio da metodologia proposta por Hosking e Wallis (1993).

No apêndice 6, são apresentados os resultados dos testes estatísticos aplicados, enquanto as séries de PDMA foram disponibilizadas em: <https://drive.google.com/drive/folders/1aEdzNb5PCvMWGkVIKAdIN7G4xG8ORwb7?usp=sharing>

### 5.3.2 Análise de frequência do período Futuro

Extraídas as séries pluviométricas futuras, procedeu-se a: i) Estimar as PDMA de cada estação em cada período futuro avaliado (2016-2043; 2044-2071 e 2072-2099) ii). Aplicar os testes estatísticos de Spearman, Wald-Wolfowitz e Mann-Whitney, com um nível de significância do 2%, para verificar a estacionariedade, independência e homogeneidade das séries.

As séries em que não foi possível aceitar as hipóteses nulas de homogeneidade e estacionariedade, foram desconsideradas, visto que foi percebido que estimar os Quantis associados aos diferentes tempos de retorno a partir das funções de probabilidade empírica não gerava resultados confiáveis, pois em alguns casos observou-se um mesmo quantil para diferentes tempos de retorno. De outro lado, as estações que não atingiram a hipótese nula de independência não foram desconsideradas, visto que, o modo de geração das séries de PDMA garantia a independência da série.

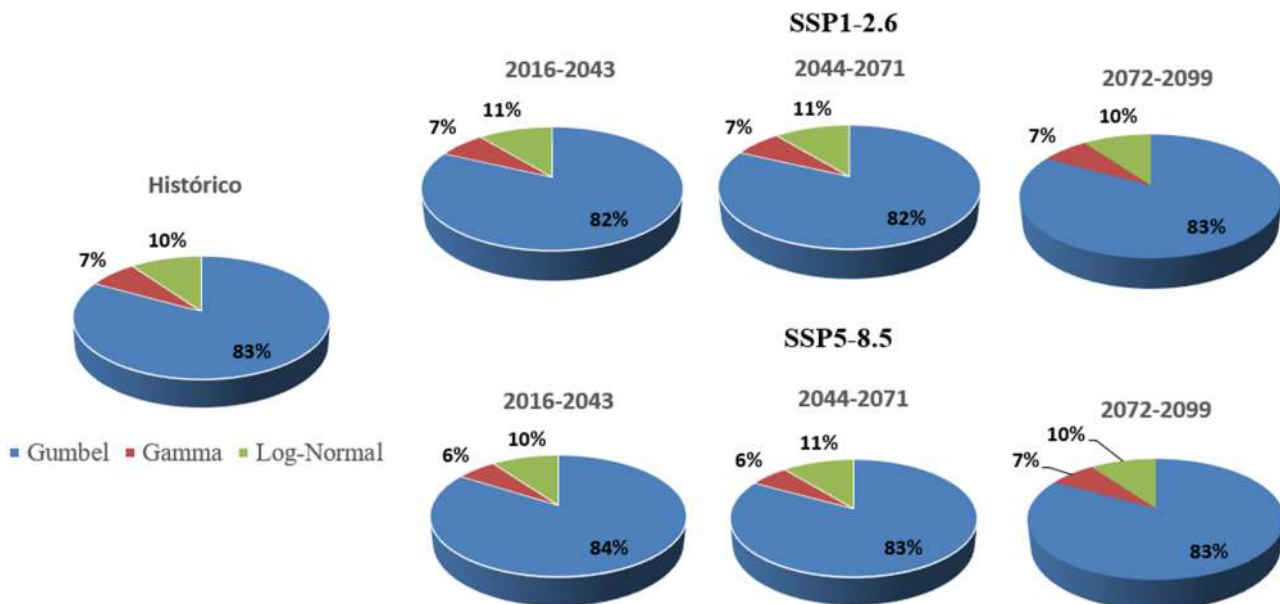
Com o propósito de identificar a aderência das séries de PDMA às funções de probabilidade contempladas, foi aplicado o teste de Kolmogorov Smirnov com um nível de significância do 2%, conforme o descrito por Naghettini e Pinto (2007).

Os testes estatísticos foram aplicados às quatro séries de PDMA disponíveis em cada estação, é dizer, a cada uma das séries dos possíveis futuros climáticos (QU, QS, FU e FS), deste modo, e considerando as 29 estações em estudo, foram aplicados um total de 116 testes em cada cenário de emissão.

Ao comparar os resultados dos testes de aderência das séries futuras que atenderam os critérios estatísticos de homogeneidade e estacionariedade, observou-se que o ajuste às diferentes distribuições de probabilidade foi proporcional ao do período histórico, tanto no cenário de emissão SSP1-2.6 como no SSP5-8.5, nos três períodos avaliados, conforme é apresentado na Figura 5-22.

A quantidade de séries que atendem os critérios estatísticos de homogeneidade e estacionariedade é variável em cada período futuro e em cada cenário de emissão, não entanto, no caso do cenário de emissão SSP1-2.6, a menor quantidade de séries que atenderam estes critérios foi no período 2016-2043, enquanto no caso do cenário SSP5-8.5 ocorreu no 2072-2099. No apêndice 6, são apresentadas as frequências de ocorrência das séries que atenderam as hipóteses nulas de homogeneidade e estacionariedade.

**Figura 5-22** – Resultados do teste de aderência do período histórico e futuro.



### 5.3.2.1 Período 2016-2043

No caso das séries do cenário de emissão SSP1-2.6, as hipóteses nulas de homogeneidade, estacionariedade e aleatoriedade foram aceitas em 111, 107 e 106 séries, enquanto no cenário de emissão SSP5-8.5, foram aceitas em 106, 103, e 116 séries respectivamente.

Os resultados do teste de aderência evidenciaram que, para as 104 séries do cenário de emissão SSP1-2.6 em que não foram rejeitadas as hipóteses nulas de estacionariedade e homogeneidade, 82, 7 e 11% se ajustaram às funções de probabilidade Gumbel, Gamma e Log-Normal respectivamente. No caso do cenário de emissão SSP5-8.5, das 103 séries que não se rejeitou as duas hipóteses nulas, 84, 6 e 10% se ajustam às funções Gumbel, Gamma e Log-Normal respectivamente.

### 5.3.2.2 Período 2044-2071

No cenário de emissão SSP5-8.5, as hipóteses nulas de homogeneidade, estacionariedade e aleatoriedade foram aceitas em 111, 114 e 116 séries, enquanto no cenário de emissão SSP1-2.6, foram aceitas em 113, 113 e 105 séries respectivamente.

Os resultados do teste de aderência evidenciaram que, das 111 séries do cenário de emissão SSP1-2.6 que se aceitou as hipóteses nulas de estacionariedade e homogeneidade, 82, 7 e 11% se ajustaram às funções de probabilidade Gumbel, Gamma e Log-Normal respectivamente. No caso do cenário de emissão SSP5-8.5, das 111 séries em que se aceitou as duas hipóteses nulas, 83, 6 e 11% se ajustam às funções Gumbel, Gamma e Log-Normal respectivamente.

### 5.3.2.3 Período 2072-2099

No cenário de emissão SSP1-2.6, as hipóteses nulas de homogeneidade, estacionariedade e aleatoriedade foram aceitas nas 116 estações, enquanto no cenário de emissão SSP5-8.5, foram aceitas em 94, 79 e 116 estações respectivamente.

Os resultados do teste de aderência evidenciaram que, das 116 séries do cenário de emissão SSP1-2.6 que as hipóteses nulas de estacionariedade e homogeneidade foram aceitas, 83, 7 e 10% se ajustaram às funções de probabilidade Gumbel, Gamma e Log-Normal respectivamente. No caso do cenário de emissão SSP5-8.5, das 76 séries em que não se rejeitaram as hipóteses nulas, 83, 7, 10, % se ajustam às funções Gumbel, Gama e Log-Normal respectivamente.

## **5.4 Identificação das alterações na frequência de ocorrência das precipitações máximas diárias**

Em termos gerais foi percebido que as alterações das alturas de chuva apresentam o mesmo comportamento nos climas futuros Frio-Seco e Frio-úmido, nos dois cenários de emissão, de outra parte os climas futuros Quente-seco e Quente-Úmido apresentam comportamentos diferentes.

Ao comparar os Quantis de diferentes tempos de retorno projetados com os históricos, observou-se que, em termos gerais se encontram dentre os intervalos de confiança dos Quantis históricos, não obstante, em alguns casos projetam valores superiores ou inferiores aos limites

do intervalo com 95% de confiança, demonstrando assim que existe uma variabilidade espacial e temporal nas precipitações projetadas pelos MCG.

Ao analisar as possíveis alterações das alturas de precipitação, nos diferentes tempos de retorno e nos diferentes cenários de emissão, notou-se que:

- As simulações associadas aos diferentes futuros climáticos não exibem um comportamento padrão, ou seja, para os cenários de emissão avaliados não se evidencia uma predominância de incrementos ou diminuições das precipitações máximas diárias associadas aos diferentes tempos de retorno na RMBH no curto prazo.

No entanto, as simulações evidenciam que a depender do clima futuro e do cenário de emissão existe a possibilidade de que se apresentem tanto incrementos como diminuições, conforme é apresentado na Tabela 5-7.

**Tabela 5-7 Porcentagem de estações que projetam incrementos ou diminuições nas intensidades das precipitações máximas diárias associadas a diferentes tempos de retorno no curto prazo.**

| Clima        | Período  | SSP1-2.6         |                  | SSP5-8.5         |                  |
|--------------|--|------------------|------------------|------------------|------------------|
|              |  | Diminuições      | Incrementos      | Diminuições      | Incrementos      |
| Quente-Úmido | 2016-2043  | 70% <sup>1</sup> | 66% <sup>1</sup> | 61% <sup>1</sup> | 56% <sup>1</sup> |
| Frio-Úmido   | 2016-2043  | 45%              | 55%              | 59%              | 41%              |
| Quente-Seco  | 2016-2043  | 21%              | 79%              | 48%              | 52%              |
| Frio-Seco    | 2016-2043  | 97%              | 3%               | 28%              | 72%              |
| SSP1-2.6     | Não há uma predominância de diminuições ou incrementos |                  |                  |                  |                  |
| SSP5-8.5     | Não há uma predominância de diminuições ou incrementos |                  |                  |                  |                  |

Varia com o Tr

- (1) No caso do clima QU no cenário de emissão SSP1-2.6, o 70% das estações avaliadas projetam diminuições das intensidades para os tempos de retorno superiores a 2 anos, enquanto o 66% projeta incrementos nas intensidades associadas a tempos de retorno superiores, no caso do cenário de emissão SSP5-8.5 o 61 % das estações analisadas projetam diminuições das precipitações associadas a tempos de retorno superiores a 15 anos e 56% projetam incrementos para os tempos de retorno de até 15 anos.

**Figura 5-23 Tempos de retorno das mesmas alturas de PDMA das séries históricas e das simuladas para o cenário de emissão SSP5-8.5 no curto prazo (2016-2043)**

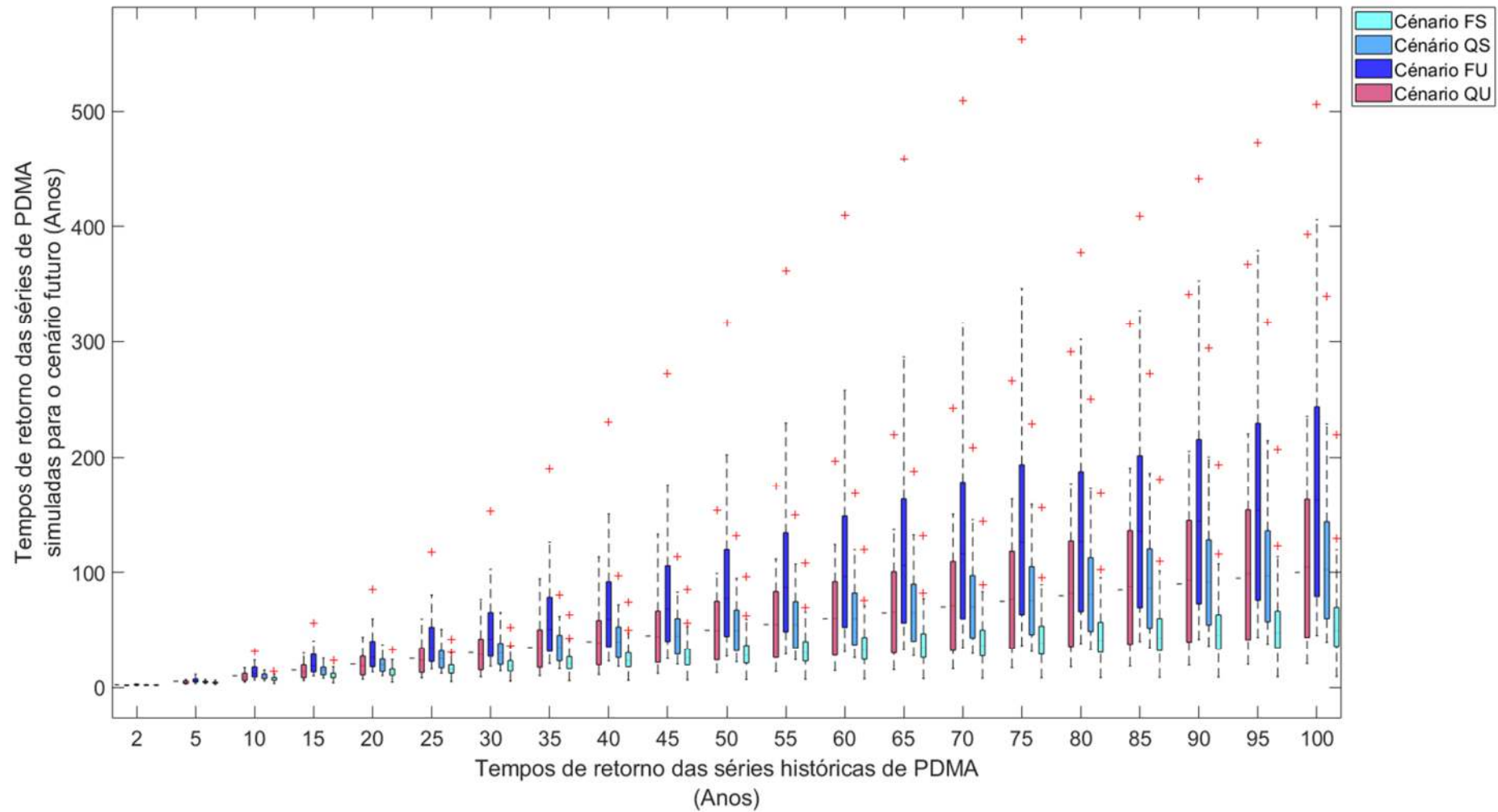
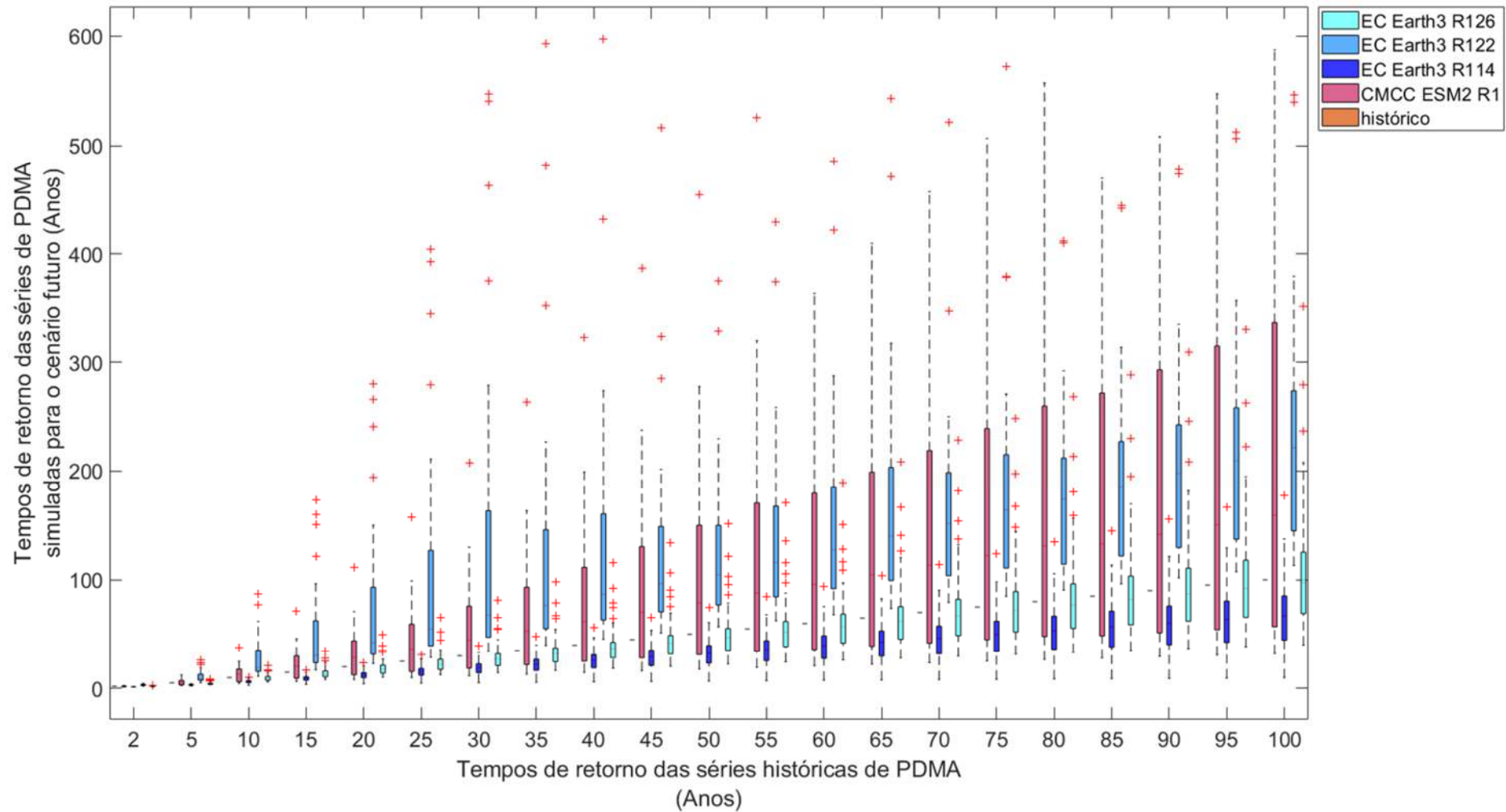


Figura 5-24 Tempos de retorno das mesmas alturas de PDMA das séries históricas e das simuladas para o cenário de emissão SSP1-2.6 no curto prazo (2016-2043)



A partir da Figura 5-23 e Figura 5-24 se evidencia que no futuro próximo existirá uma variação nas frequências de ocorrências das PDMA, tanto no cenário de emissão SSP1-2.6 quanto no SSP5-8.5, no entanto, constatou-se que quanto maior for o tempo de retorno, maiores são os intervalos das variações projetadas.

Nos climas QU e FS do cenário de emissão SSP1-2.6 e QU, FU e QS do SSP5-8.5, são projetadas diminuições da frequência de ocorrência das PDMA, enquanto que no futuro climático QS do Cenário SSP1-2.6 e FS do SSP5-8.5, se projetam incrementos da frequência de ocorrência das PDMA (Ver Tabela 5-8 e Tabela 5-9 ).

**Tabela 5-8 Frequência de ocorrência das PDMA atuais no futuro de curto prazo, cenário de emissão SSP1-2.6**

| TR<br>(Anos) | Cenário QU |                      |        | Cenário QS |         |       | Cenário FS |         |        | Cenário FU |         |       |
|--------------|------------|----------------------|--------|------------|---------|-------|------------|---------|--------|------------|---------|-------|
|              | Mín        | Mediana <sup>1</sup> | Máx    | Mín        | Mediana | Máx   | Mín        | Mediana | Máx    | Mín        | Mediana | Máx   |
| 2            | 1,3        | 1,9 <sup>2</sup>     | 2,7    | 1,2        | 1,4     | 1,7   | 1,9        | 2,9     | 4,6    | 1,4        | 1,7     | 2,7   |
| 5            | 2,5        | 5,4                  | 12,4   | 2,1        | 3,1     | 4,3   | 5,2        | 8,4     | 26,3   | 3,4        | 4,1     | 8,8   |
| 10           | 4,5        | 13,1                 | 37,7   | 3,0        | 6,3     | 10,0  | 11,2       | 19,0    | 87,4   | 5,9        | 8,4     | 21,1  |
| 15           | 6,4        | 20,6                 | 71,1   | 3,6        | 9,4     | 16,6  | 17,2       | 30,4    | 173,2  | 8,2        | 12,9    | 34,9  |
| 20           | 8,2        | 28,4                 | 111,1  | 4,2        | 12,4    | 23,8  | 22,9       | 42,4    | 279,7  | 10,4       | 17,5    | 49,6  |
| 25           | 9,9        | 36,5                 | 156,9  | 4,7        | 15,6    | 31,5  | 28,5       | 54,8    | 404,9  | 12,6       | 22,4    | 65,2  |
| 30           | 11,6       | 44,7                 | 207,7  | 5,2        | 18,9    | 39,5  | 34,2       | 67,6    | 547,0  | 14,6       | 27,3    | 81,5  |
| 35           | 13,2       | 53,1                 | 263,2  | 5,6        | 22,3    | 47,9  | 39,9       | 76,5    | 593,0  | 16,6       | 32,1    | 98,3  |
| 40           | 14,8       | 61,6                 | 323,0  | 6,0        | 25,8    | 56,6  | 45,5       | 86,8    | 597,3  | 18,6       | 37,0    | 115,7 |
| 45           | 16,3       | 70,2                 | 386,8  | 6,4        | 29,2    | 65,6  | 51,2       | 96,4    | 516,3  | 20,5       | 42,0    | 133,5 |
| 50           | 17,8       | 79,0                 | 454,5  | 6,8        | 32,6    | 74,8  | 56,8       | 104,4   | 375,4  | 22,4       | 46,9    | 151,7 |
| 55           | 19,3       | 87,8                 | 525,7  | 7,1        | 36,0    | 84,3  | 62,4       | 115,8   | 429,4  | 24,3       | 51,9    | 170,3 |
| 60           | 20,8       | 95,8                 | 604,0  | 7,4        | 39,4    | 93,9  | 68,1       | 127,3   | 485,4  | 26,2       | 56,9    | 189,3 |
| 65           | 22,3       | 104,5                | 699,8  | 7,8        | 42,8    | 103,8 | 73,7       | 139,9   | 543,3  | 28,0       | 61,9    | 208,6 |
| 70           | 23,8       | 113,3                | 804,4  | 8,1        | 46,3    | 113,9 | 79,3       | 151,6   | 612,2  | 29,8       | 66,9    | 228,2 |
| 75           | 25,2       | 122,1                | 920,6  | 8,4        | 49,8    | 124,1 | 84,9       | 163,9   | 692,7  | 31,6       | 71,9    | 248,1 |
| 80           | 26,6       | 130,9                | 1049,4 | 8,7        | 53,2    | 134,5 | 90,5       | 173,9   | 787,7  | 33,4       | 76,9    | 268,3 |
| 85           | 28,0       | 132,8                | 1192,8 | 9,0        | 56,7    | 145,1 | 96,1       | 185,7   | 899,6  | 35,1       | 82,0    | 288,8 |
| 90           | 29,4       | 141,5                | 1351,3 | 9,3        | 60,2    | 155,8 | 101,8      | 197,5   | 1030,0 | 36,8       | 87,0    | 309,5 |
| 95           | 30,8       | 150,2                | 1526,6 | 9,5        | 63,6    | 166,7 | 107,4      | 209,4   | 1184,0 | 38,6       | 92,1    | 330,4 |
| 100          | 32,2       | 159,0                | 1720,7 | 9,8        | 67,0    | 177,7 | 113,0      | 221,4   | 1358,4 | 40,3       | 97,2    | 351,6 |

(1) Devido a que apresenta uma menor influência dos valores extremos foi selecionada a mediana como medida de tendência central das alterações projetadas.

(2) Se projeta que a precipitação associada ao tempo de retorno de 2 anos na atualidade, se encontrará em torno dos 1.9 anos no futuro no clima QU.

A alta variabilidade na frequência de ocorrência das PDMA deixa em evidência que as projeções de precipitação dos MCG apresentam uma alta variabilidade espacial das projeções.

**Tabela 5-9 Frequência de ocorrência das PDMA atuais no futuro de curto prazo, cenário de emissão SSP5-8.5**

| TR<br>(Anos) | Cenário QU |         |       | Cenário FU |         |       | Cenário QS |         |       | Cenário FS |         |       |
|--------------|------------|---------|-------|------------|---------|-------|------------|---------|-------|------------|---------|-------|
|              | Mín        | Mediana | Máx   | Mín        | Mediana | Máx   | Mín        | Mediana | Máx   | Mín        | Mediana | Máx   |
| 2            | 1,4        | 1,6     | 2,0   | 1,4        | 2,1     | 2,9   | 1,5        | 1,9     | 2,3   | 1,5        | 1,8     | 2,2   |
| 5            | 2,7        | 3,9     | 6,5   | 3,1        | 5,6     | 11,2  | 3,2        | 4,7     | 6,7   | 2,3        | 3,8     | 6,1   |
| 10           | 4,3        | 8,5     | 16,9  | 6,4        | 11,9    | 31,4  | 5,6        | 9,9     | 14,9  | 3,2        | 7,0     | 14,1  |
| 15           | 5,8        | 13,4    | 29,6  | 9,8        | 18,4    | 56,5  | 7,9        | 14,8    | 25,1  | 3,8        | 10,0    | 22,9  |
| 20           | 7,0        | 18,4    | 44,0  | 13,3       | 25,9    | 85,5  | 10,1       | 19,8    | 37,3  | 4,3        | 12,7    | 32,3  |
| 25           | 8,1        | 23,4    | 59,7  | 15,8       | 33,8    | 117,8 | 12,1       | 24,8    | 50,8  | 4,8        | 15,4    | 42,2  |
| 30           | 9,1        | 28,5    | 76,5  | 18,2       | 42,1    | 152,8 | 14,2       | 29,7    | 65,2  | 5,2        | 18,0    | 52,5  |
| 35           | 10,1       | 33,7    | 94,4  | 20,4       | 50,6    | 190,4 | 16,2       | 34,7    | 80,6  | 5,6        | 20,5    | 63,0  |
| 40           | 11,0       | 38,9    | 113,3 | 22,6       | 59,4    | 230,3 | 18,1       | 39,7    | 96,9  | 6,0        | 22,9    | 73,9  |
| 45           | 11,9       | 44,2    | 133,0 | 24,8       | 68,4    | 272,2 | 20,0       | 44,7    | 113,8 | 6,3        | 25,3    | 85,1  |
| 50           | 12,8       | 49,5    | 153,5 | 26,8       | 77,6    | 316,2 | 21,9       | 49,7    | 131,5 | 6,6        | 27,7    | 96,4  |
| 55           | 13,7       | 54,9    | 174,7 | 28,8       | 87,0    | 362,0 | 23,7       | 54,7    | 149,9 | 7,0        | 30,0    | 108,0 |
| 60           | 14,5       | 60,3    | 196,7 | 30,8       | 96,6    | 409,6 | 25,6       | 59,8    | 168,9 | 7,2        | 32,3    | 119,8 |
| 65           | 15,3       | 65,7    | 219,3 | 32,7       | 106,3   | 458,8 | 27,4       | 65,1    | 188,4 | 7,5        | 34,5    | 131,8 |
| 70           | 16,1       | 71,2    | 242,5 | 34,6       | 116,2   | 509,6 | 29,2       | 70,4    | 208,6 | 7,8        | 36,7    | 143,9 |
| 75           | 16,8       | 76,7    | 266,3 | 36,5       | 126,2   | 561,9 | 31,0       | 75,7    | 229,2 | 8,1        | 38,8    | 156,2 |
| 80           | 17,6       | 82,2    | 290,7 | 38,3       | 126,4   | 377,2 | 32,7       | 81,0    | 250,4 | 8,3        | 41,0    | 168,7 |
| 85           | 18,3       | 87,8    | 315,6 | 40,1       | 135,4   | 408,6 | 34,5       | 86,3    | 272,0 | 8,6        | 43,1    | 181,3 |
| 90           | 19,0       | 93,3    | 341,0 | 41,8       | 144,4   | 440,7 | 36,2       | 91,7    | 294,1 | 8,8        | 45,4    | 194,0 |
| 95           | 19,8       | 98,9    | 367,0 | 43,6       | 153,5   | 473,3 | 37,9       | 97,1    | 316,7 | 9,0        | 47,6    | 206,9 |
| 100          | 20,5       | 104,6   | 393,4 | 45,3       | 162,6   | 506,5 | 39,6       | 102,5   | 339,7 | 9,3        | 49,9    | 219,9 |

- No médio prazo foi observado que existe uma predominância de incrementos nas intensidades das precipitações máximas diárias associadas aos diferentes tempos de retorno na RMBH, tanto no cenário de emissão SSP1-2.6 quanto no SSP5-8.5. Essa tendência de incremento é coerente com a tendência apresentada por Iturbide *et al.* (2021), para o médio prazo.

**Tabela 5-10 Porcentagem de estações que projetam incrementos ou diminuições nas intensidades das precipitações máximas diárias associadas a diferentes tempos de retorno no médio prazo.**

| Clima        | Período  | SSP1-2.6    |             | SSP5-8.5    |             |
|--------------|--|-------------|-------------|-------------|-------------|
|              |  | Diminuições | Incrementos | Diminuições | Incrementos |
| Quente-Úmido | 2044-2071  | 17%         | 83%         | 13%         | 87%         |
| Frio-Úmido   | 2044-2071  | 42%         | 58%         | 72%         | 28%         |
| Quente-Seco  | 2044-2071  | 51%         | 49%         | 18%         | 82%         |
| Frio-Seco    | 2044-2071  | 48%         | 52%         | 58%         | 42%         |
| SSP1-2.6     | Predominância de incrementos                           |             |             |             |             |
| SSP5-8.5     | Não há uma predominância de diminuições ou incrementos |             |             |             |             |

Figura 5-25 Tempos de retorno das mesmas alturas de PDMA das séries históricas e das simuladas para o cenário de emissão SSP5-8.5 no médio prazo (2044-2072)

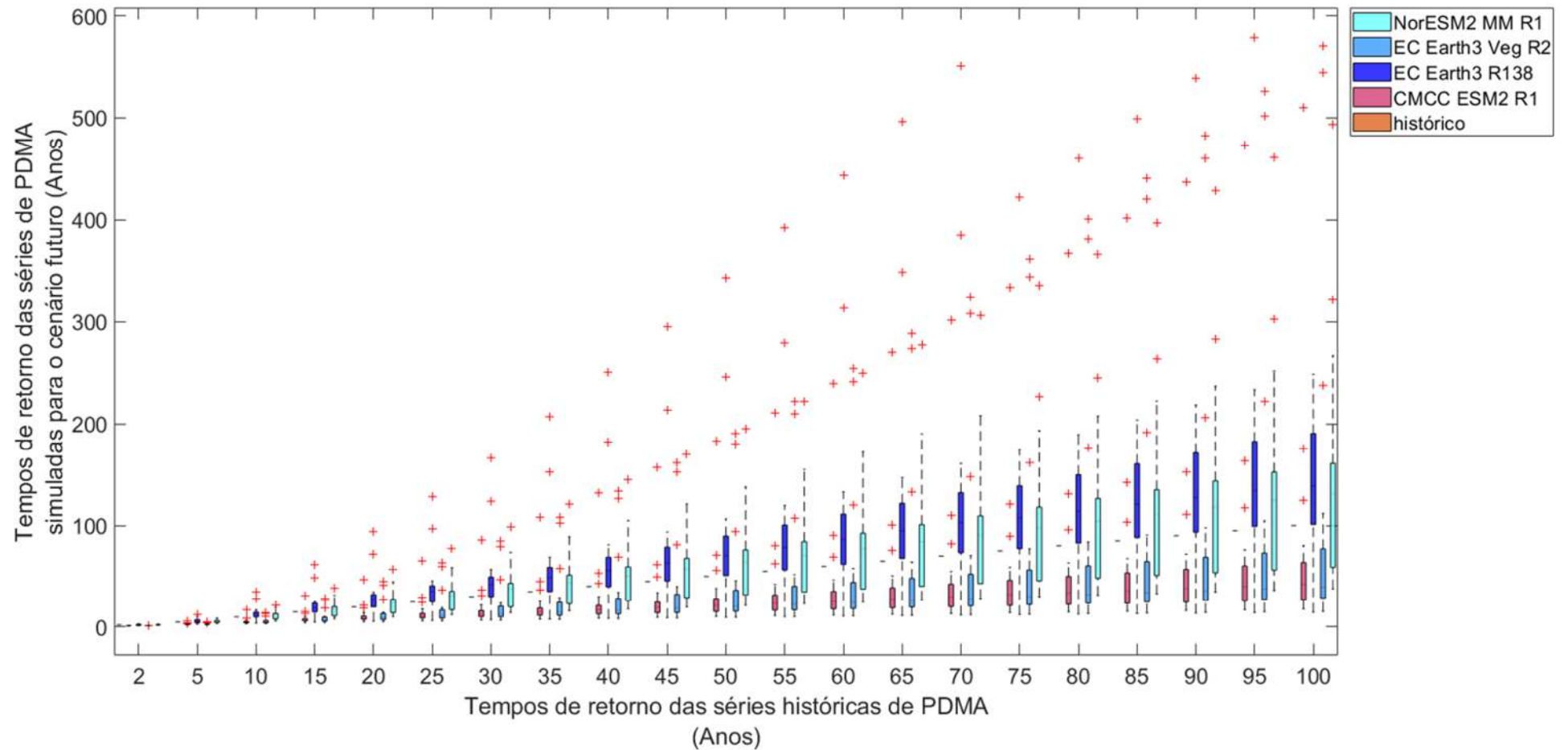
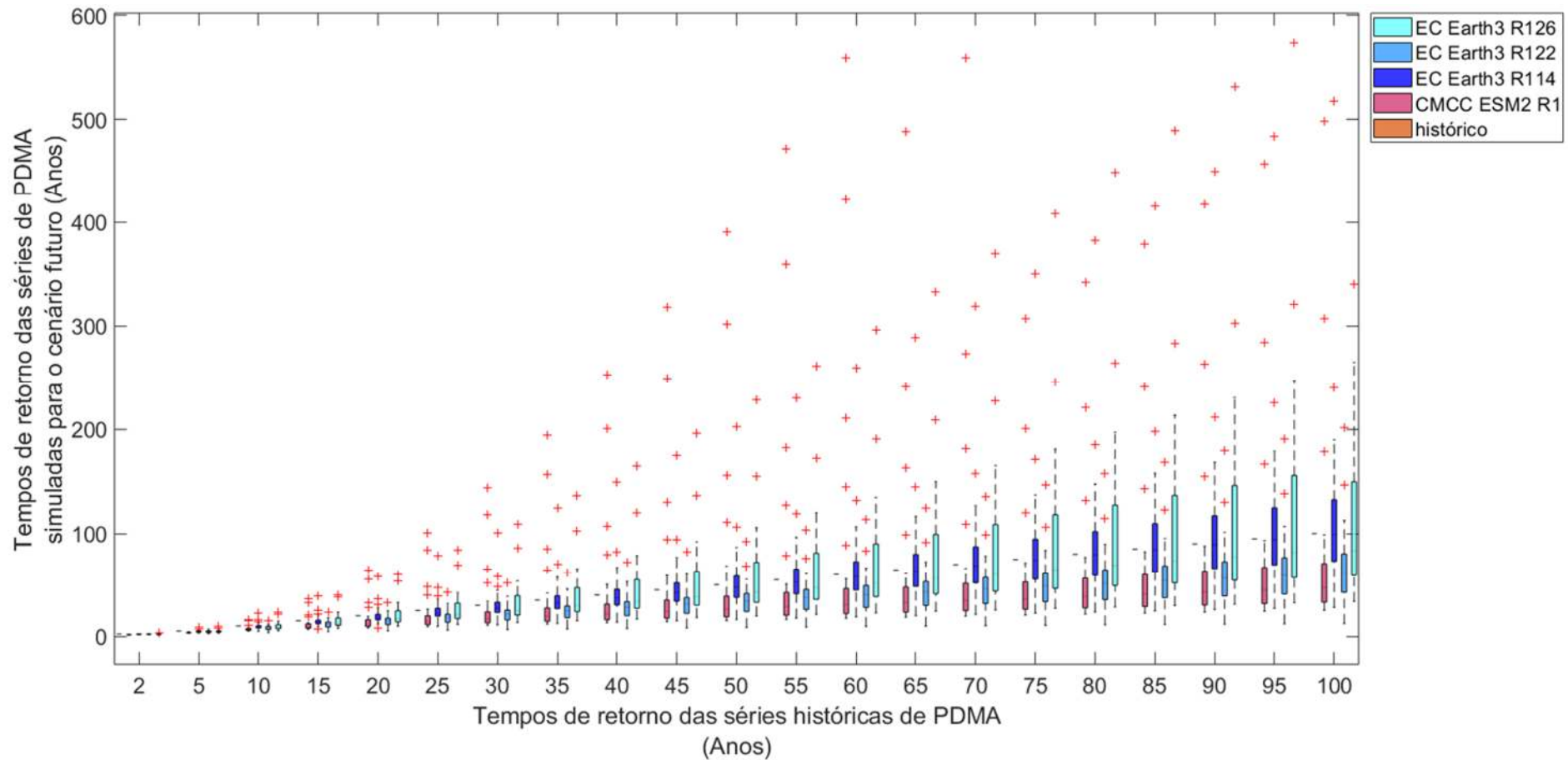


Figura 5-26 Tempos de retorno das mesmas alturas de PDMA das séries históricas e das simuladas para o cenário de emissão SSP1-2.6 no médio prazo (2044-2072)



Visto que existe uma predominância de incremento das intensidades das PDMA no cenário de emissão SSP1-2.6 foi evidenciada uma predominância do incremento na frequência de ocorrência das PDMA no médio prazo, o qual se associa diretamente à uma tendência de diminuição do tempo de retorno das mesmas alturas de precipitação no futuro (Ver Tabela 5-11 e Figura 5-26).

De outra parte, no cenário de emissão SSP5-8.5 foi projetado um incremento da frequência de ocorrência das PDMA nos climas futuros QU e QS, enquanto nos futuros climáticos FU e FS foram projetadas diminuições (ver Tabela 5-12 e Figura 5-25).

**Tabela 5-11 Frequência de ocorrência das PDMA atuais no futuro de médio prazo, cenário de emissão SSP1-2.6**

| TR<br>(Anos) | Cenário QU |         |       | Cenário QS |         |       | Cenário FS |         |       | Cenário FU |         |       |
|--------------|------------|---------|-------|------------|---------|-------|------------|---------|-------|------------|---------|-------|
|              | Mín        | Mediana | Máx   | Mín        | Mediana | Máx   | Mín        | Mediana | Máx   | Mín        | Mediana | Máx   |
| 2            | 1,1        | 1,6     | 1,9   | 1,4        | 1,8     | 2,3   | 1,5        | 2,0     | 2,4   | 1,4        | 1,8     | 3,1   |
| 5            | 2,9        | 3,5     | 4,4   | 2,9        | 4,3     | 8,4   | 2,5        | 4,4     | 6,7   | 2,9        | 4,4     | 10,1  |
| 10           | 4,9        | 6,4     | 16,4  | 4,8        | 8,9     | 22,3  | 3,6        | 8,1     | 14,9  | 5,2        | 8,6     | 23,5  |
| 15           | 6,5        | 9,1     | 36,6  | 6,5        | 13,4    | 39,1  | 4,5        | 11,6    | 23,7  | 7,6        | 12,8    | 39,8  |
| 20           | 8,0        | 11,8    | 64,6  | 8,0        | 17,8    | 58,0  | 5,2        | 15,0    | 32,8  | 9,8        | 16,9    | 60,5  |
| 25           | 9,4        | 14,4    | 100,3 | 9,5        | 22,2    | 78,7  | 5,8        | 18,3    | 42,3  | 11,6       | 21,0    | 83,7  |
| 30           | 10,7       | 16,9    | 143,6 | 11,0       | 27,1    | 101,0 | 6,4        | 21,6    | 51,9  | 13,3       | 25,1    | 109,0 |
| 35           | 11,9       | 19,3    | 194,4 | 12,4       | 32,1    | 124,6 | 7,0        | 24,8    | 61,8  | 15,0       | 29,5    | 136,2 |
| 40           | 13,1       | 21,6    | 252,6 | 13,7       | 37,2    | 149,4 | 7,5        | 28,0    | 71,9  | 16,6       | 33,8    | 165,2 |
| 45           | 14,2       | 23,9    | 318,2 | 15,0       | 42,3    | 175,4 | 8,0        | 31,2    | 82,1  | 18,2       | 38,2    | 195,8 |
| 50           | 15,3       | 26,2    | 391,1 | 16,3       | 47,5    | 202,4 | 8,5        | 34,3    | 92,5  | 19,7       | 42,7    | 228,0 |
| 55           | 16,4       | 28,4    | 471,2 | 17,6       | 52,8    | 230,4 | 9,0        | 37,3    | 103,0 | 21,3       | 47,1    | 261,5 |
| 60           | 17,5       | 30,7    | 558,6 | 18,8       | 58,1    | 259,2 | 9,4        | 40,3    | 113,6 | 22,7       | 51,5    | 296,4 |
| 65           | 18,5       | 32,6    | 488,0 | 20,0       | 63,5    | 289,0 | 9,8        | 43,2    | 124,4 | 24,2       | 56,0    | 332,6 |
| 70           | 19,5       | 34,8    | 558,8 | 21,2       | 68,9    | 319,5 | 10,2       | 46,0    | 135,2 | 25,6       | 60,5    | 370,0 |
| 75           | 20,5       | 36,5    | 307,2 | 22,4       | 74,3    | 350,8 | 10,6       | 48,7    | 146,1 | 27,0       | 64,9    | 408,6 |
| 80           | 21,5       | 38,6    | 342,4 | 23,5       | 79,3    | 382,9 | 11,0       | 51,4    | 157,1 | 28,4       | 69,3    | 448,3 |
| 85           | 22,4       | 40,7    | 379,2 | 24,7       | 84,3    | 415,7 | 11,4       | 54,0    | 168,2 | 29,8       | 73,6    | 489,1 |
| 90           | 23,4       | 42,9    | 417,4 | 25,8       | 89,3    | 449,1 | 11,8       | 56,7    | 179,4 | 31,1       | 77,9    | 531,0 |
| 95           | 24,3       | 45,0    | 457,1 | 26,9       | 94,3    | 483,2 | 12,1       | 59,3    | 190,7 | 32,5       | 81,6    | 573,8 |
| 100          | 25,2       | 47,1    | 498,3 | 28,0       | 99,3    | 518,0 | 12,5       | 61,9    | 202,0 | 33,8       | 83,3    | 340,7 |

**Tabela 5-12 Frequência de ocorrência das PDMA atuais no futuro de médio prazo, cenário de emissão SSP5-8.5**

| TR<br>(Anos) | Cenário QU |         |      | Cenário FU |         |       | Cenário QS |         |      | Cenário FS |         |      |
|--------------|------------|---------|------|------------|---------|-------|------------|---------|------|------------|---------|------|
|              | Mín        | Mediana | Máx  | Mín        | Mediana | Máx   | Mín        | Mediana | Máx  | Mín        | Mediana | Máx  |
| 2            | 1,1        | 1,3     | 1,6  | 1,2        | 2,0     | 3,1   | 1,1        | 1,3     | 1,5  | 1,7        | 2,1     | 2,9  |
| 5            | 2,0        | 2,6     | 5,9  | 2,6        | 5,7     | 12,4  | 2,1        | 2,7     | 4,9  | 3,5        | 5,8     | 8,8  |
| 10           | 3,1        | 4,4     | 16,7 | 3,8        | 12,6    | 34,6  | 3,3        | 4,9     | 14,7 | 5,9        | 12,1    | 22,2 |
| 15           | 4,2        | 6,5     | 30,6 | 4,8        | 19,0    | 62,1  | 4,4        | 6,9     | 28,1 | 8,2        | 18,3    | 38,6 |
| 20           | 5,2        | 8,5     | 47,0 | 5,6        | 26,8    | 93,6  | 5,3        | 8,9     | 44,5 | 10,3       | 24,5    | 57,0 |
| 25           | 6,1        | 10,6    | 65,5 | 6,4        | 35,0    | 128,7 | 6,1        | 10,9    | 63,5 | 12,3       | 30,8    | 77,0 |

| TR<br>(Anos) | Cenário QU |         |       | Cenário FU |         |        | Cenário QS |         |       | Cenário FS |         |       |
|--------------|------------|---------|-------|------------|---------|--------|------------|---------|-------|------------|---------|-------|
|              | Mín        | Mediana | Máx   | Mín        | Mediana | Máx    | Mín        | Mediana | Máx   | Mín        | Mediana | Máx   |
| 30           | 7,0        | 12,8    | 86,0  | 7,2        | 42,0    | 166,6  | 6,9        | 12,8    | 84,8  | 14,2       | 37,2    | 98,4  |
| 35           | 7,9        | 15,0    | 108,1 | 7,8        | 48,9    | 207,3  | 7,6        | 14,8    | 108,3 | 16,1       | 43,8    | 121,1 |
| 40           | 8,7        | 17,1    | 131,7 | 8,5        | 55,9    | 250,3  | 8,3        | 16,7    | 133,9 | 17,9       | 50,5    | 144,9 |
| 45           | 9,6        | 19,3    | 156,8 | 9,1        | 63,1    | 295,6  | 9,0        | 18,6    | 161,4 | 19,7       | 57,2    | 169,7 |
| 50           | 10,4       | 21,4    | 183,3 | 9,7        | 70,4    | 343,0  | 9,7        | 20,6    | 190,7 | 21,5       | 63,9    | 195,4 |
| 55           | 11,2       | 23,4    | 211,0 | 10,3       | 78,3    | 392,3  | 10,3       | 22,5    | 221,7 | 23,2       | 70,6    | 222,0 |
| 60           | 11,9       | 25,5    | 240,0 | 10,8       | 86,4    | 443,4  | 11,0       | 24,4    | 254,4 | 24,9       | 77,3    | 249,5 |
| 65           | 12,7       | 27,5    | 270,1 | 11,3       | 94,4    | 496,3  | 11,6       | 26,3    | 288,7 | 26,6       | 84,0    | 277,7 |
| 70           | 13,4       | 29,6    | 301,4 | 11,9       | 102,6   | 550,8  | 12,2       | 28,1    | 324,6 | 28,2       | 90,7    | 306,6 |
| 75           | 14,2       | 31,7    | 333,7 | 12,4       | 107,4   | 622,4  | 12,8       | 30,0    | 362,0 | 29,8       | 97,5    | 336,2 |
| 80           | 14,9       | 33,7    | 367,1 | 12,9       | 114,1   | 700,4  | 13,3       | 31,9    | 400,8 | 31,4       | 104,2   | 366,5 |
| 85           | 15,7       | 35,8    | 401,4 | 13,3       | 120,8   | 792,2  | 13,9       | 33,8    | 441,1 | 33,0       | 111,0   | 397,4 |
| 90           | 16,4       | 37,8    | 436,7 | 13,8       | 127,5   | 898,8  | 14,4       | 35,6    | 482,7 | 34,6       | 117,8   | 429,0 |
| 95           | 17,1       | 39,9    | 473,0 | 14,3       | 134,1   | 1021,1 | 15,0       | 37,5    | 525,7 | 36,2       | 124,6   | 461,1 |
| 100          | 17,8       | 42,1    | 510,2 | 14,7       | 138,6   | 1170,6 | 15,5       | 39,3    | 570,0 | 37,7       | 131,5   | 493,8 |

- No longo prazo foi observado que existe uma predominância de incrementos nas intensidades das precipitações diárias máximas associadas aos diferentes tempos de retorno na RMBH, tanto no cenário de emissão SSP1-2.6 quanto no SSP5-8.5. Essa tendência de incremento é maior que a do médio prazo e coerente com a tendência de incremento apresentada por Iturbide *et al.* (2021), para o longo prazo.

**Tabela 5-13 Percentagem de estações que projetam incrementos ou diminuições nas intensidades das precipitações máximas diárias associadas a diferentes tempos de retorno no longo prazo.**

| Clima        | Período                            | SSP1-2.6    |                  | SSP1-8.5    |             |
|--------------|------------------------------------|-------------|------------------|-------------|-------------|
|              |                                    | Diminuições | Incrementos      | Diminuições | Incrementos |
| Quente-Úmido | 2072-2099                          | -           | 100%             | -           | 100%        |
| Frio-Úmido   | 2072-2099                          | -           | 100%             | 20%         | 80%         |
| Quente-Seco  | 2072-2099                          | 62%         | 69% <sup>1</sup> | 21%         | 79%         |
| Frio-Seco    | 2072-2099                          | 52%         | 48%              | 27%         | 73%         |
| SSP1-2.6     | Predominância clara de incrementos |             |                  |             |             |
| SSP5-8.5     | Predominância clara de incrementos |             |                  |             |             |

Varia com o Tr

- (1) No caso do clima QS no cenário de emissão SSP1-2.6, o 55% das estações avaliadas projetam diminuições das intensidades para os tempos de retorno de 2 anos, enquanto o 69% projetam incrementos nas intensidades associadas a tempos de retorno superiores,

**Figura 5-27** Tempos de retorno das mesmas alturas de PDMA das séries históricas e das simuladas para o cenário de emissão SSP5-8.5 no longo prazo (2072-2073)

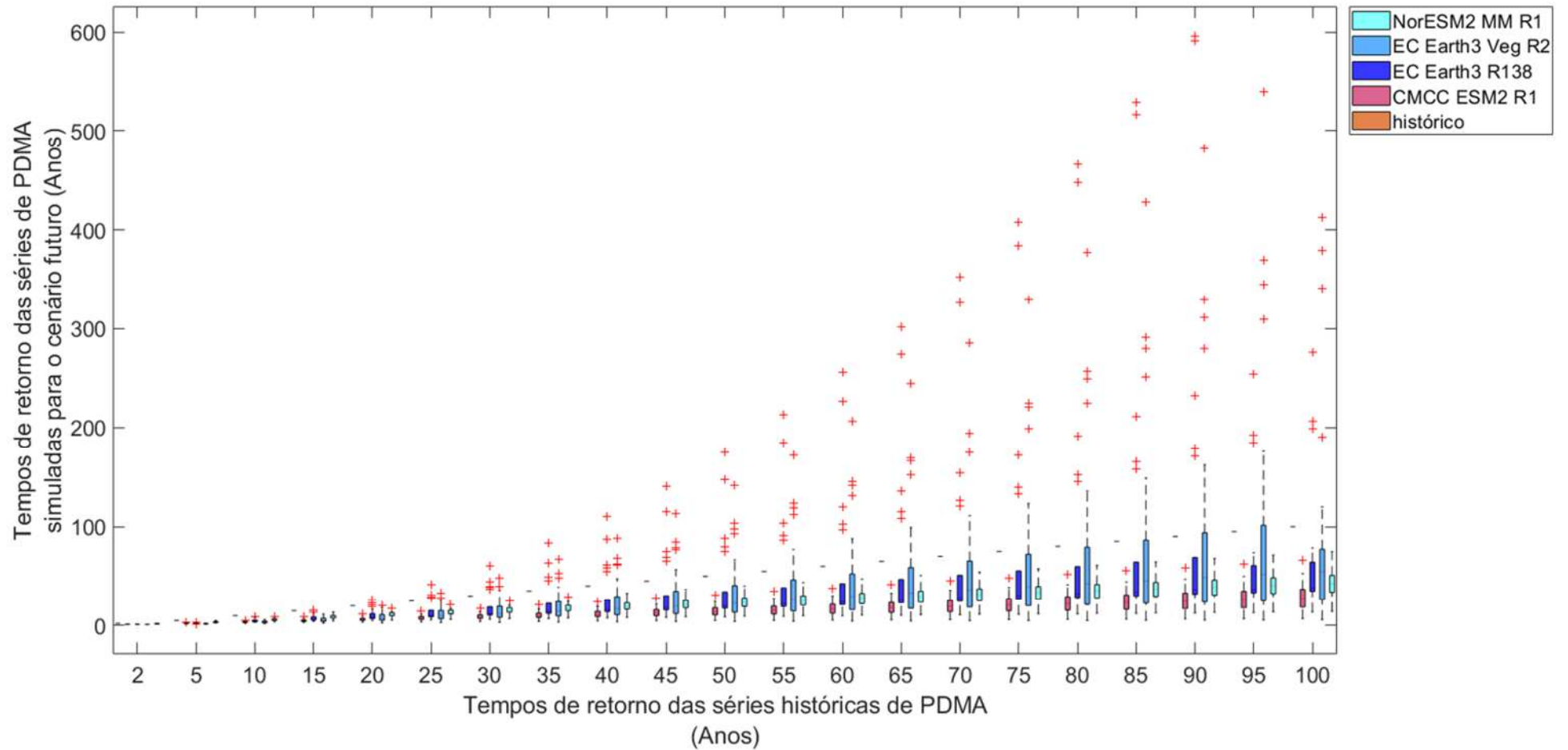
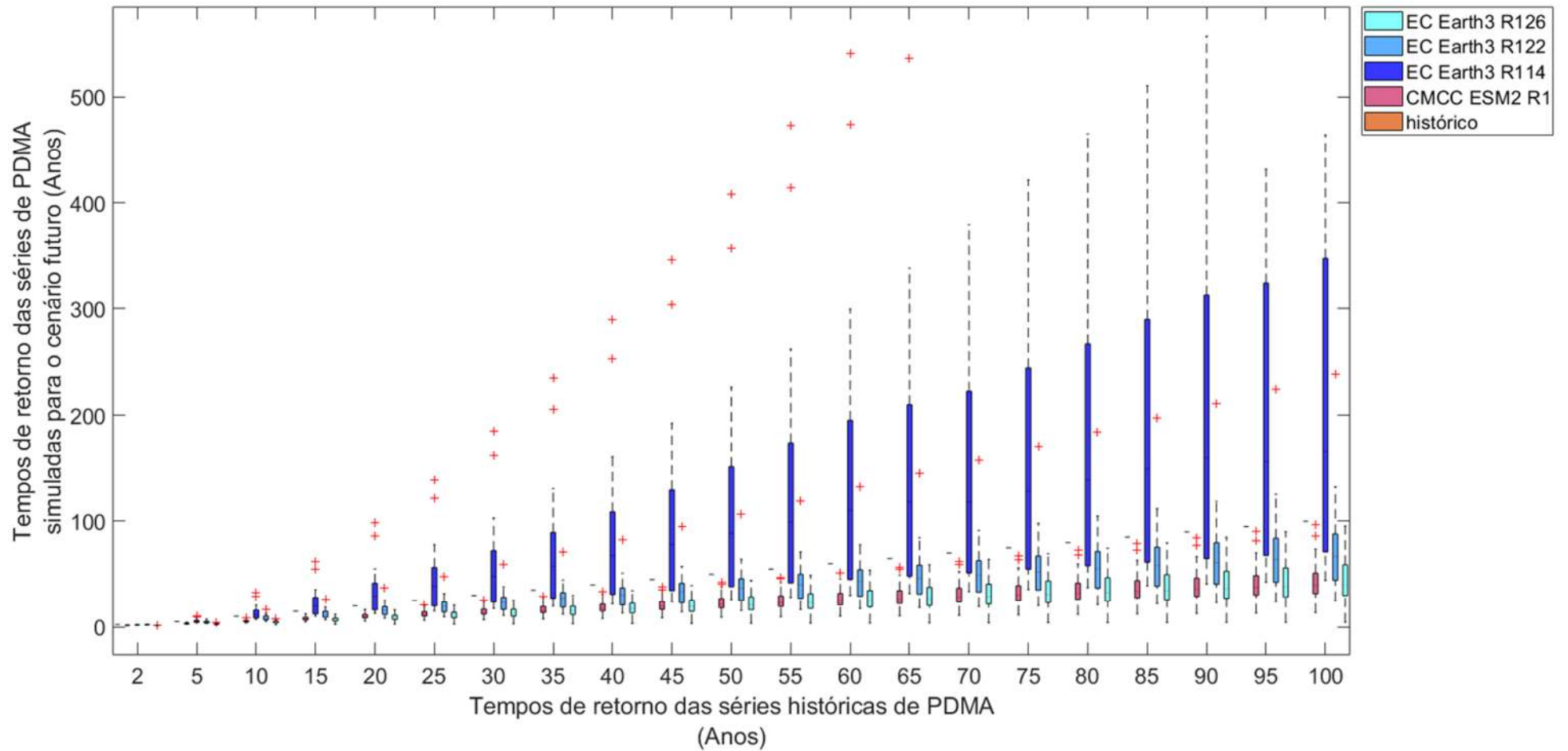


Figura 5-28 Tempos de retorno das mesmas alturas de PDMA das séries históricas e das simuladas para o cenário de emissão SSP1-2.6 no longo prazo (2072-2073)



Visto que existe uma predominância de incrementos nas intensidades das PDMA em ambos cenários de emissão, constata-se uma predominância dos incrementos das frequências de ocorrência das PDMA, o qual se associa diretamente à diminuição do tempo de retorno das precipitações no futuro (Ver Tabela 5-14, Tabela 5-15, Figura 5-27), no entanto, no caso do clima futuro QS do cenário de emissão SSP1-2.6 se observa uma predominância de diminuição das intensidades das PDMA, que conduz à diminuição da frequência de ocorrência das PDMA (Ver Figura 5-27).

**Tabela 5-14 Frequência de ocorrência das PDMA atuais no futuro de longo prazo, cenário de emissão SSP1-2.6**

| TR<br>(Anos) | Cenário QU |         |      | Cenário (QS) |         |       | Cenário (FS) |         |       | Cenário (FU) |         |      |
|--------------|------------|---------|------|--------------|---------|-------|--------------|---------|-------|--------------|---------|------|
|              | Mín        | Mediana | Máx  | Mín          | Mediana | Máx   | Mín          | Mediana | Máx   | Mín          | Mediana | Máx  |
| 2            | 1,1        | 1,6     | 1,9  | 1,3          | 1,9     | 2,3   | 1,6          | 1,9     | 2,5   | 1,1          | 1,3     | 1,9  |
| 5            | 2,5        | 3,0     | 4,5  | 3,8          | 5,2     | 10,8  | 3,2          | 4,4     | 7,3   | 1,6          | 2,7     | 4,2  |
| 10           | 3,7        | 5,2     | 8,5  | 7,1          | 11,6    | 32,9  | 5,2          | 8,1     | 16,5  | 2,0          | 5,0     | 8,0  |
| 15           | 4,7        | 7,6     | 12,5 | 10,1         | 19,8    | 62,5  | 6,8          | 11,9    | 26,5  | 2,3          | 7,2     | 11,9 |
| 20           | 5,5        | 9,7     | 16,6 | 12,8         | 29,0    | 98,2  | 8,2          | 15,8    | 37,0  | 2,5          | 9,3     | 16,3 |
| 25           | 6,2        | 11,8    | 20,8 | 15,3         | 38,4    | 139,2 | 9,6          | 19,6    | 48,0  | 2,7          | 11,4    | 20,7 |
| 30           | 6,8        | 13,9    | 25,1 | 17,6         | 47,9    | 184,9 | 10,9         | 23,5    | 59,3  | 2,9          | 13,4    | 25,2 |
| 35           | 7,4        | 15,8    | 29,4 | 19,8         | 57,6    | 234,9 | 12,1         | 27,1    | 70,9  | 3,0          | 15,4    | 29,9 |
| 40           | 8,0        | 17,6    | 33,7 | 21,9         | 67,7    | 289,0 | 13,2         | 30,4    | 82,7  | 3,2          | 17,4    | 34,6 |
| 45           | 8,6        | 19,4    | 38,0 | 24,0         | 78,0    | 346,9 | 14,3         | 33,7    | 94,8  | 3,3          | 19,3    | 39,4 |
| 50           | 9,1        | 21,3    | 42,3 | 26,0         | 88,6    | 408,3 | 15,4         | 36,9    | 107,1 | 3,4          | 21,3    | 44,2 |
| 55           | 9,6        | 23,1    | 46,6 | 28,0         | 99,4    | 473,2 | 16,5         | 40,0    | 119,5 | 3,6          | 23,2    | 49,1 |
| 60           | 10,1       | 24,9    | 51,1 | 29,9         | 110,3   | 541,3 | 17,5         | 43,1    | 132,2 | 3,7          | 25,1    | 54,1 |
| 65           | 10,6       | 26,7    | 56,4 | 31,8         | 118,2   | 536,4 | 18,5         | 46,2    | 145,0 | 3,8          | 27,0    | 59,1 |
| 70           | 11,0       | 28,5    | 61,9 | 33,7         | 118,0   | 379,3 | 19,4         | 49,3    | 157,9 | 3,9          | 28,8    | 64,2 |
| 75           | 11,5       | 30,2    | 67,4 | 35,5         | 128,2   | 421,5 | 20,4         | 52,3    | 171,0 | 4,0          | 30,7    | 69,3 |
| 80           | 11,9       | 32,1    | 73,1 | 37,3         | 138,6   | 465,3 | 21,3         | 55,3    | 184,2 | 4,1          | 32,6    | 74,4 |
| 85           | 12,3       | 34,0    | 78,8 | 39,1         | 149,1   | 510,6 | 22,2         | 58,2    | 197,5 | 4,2          | 34,4    | 79,6 |
| 90           | 12,7       | 35,8    | 84,7 | 40,8         | 159,8   | 557,2 | 23,1         | 61,2    | 211,0 | 4,3          | 36,3    | 84,9 |
| 95           | 13,1       | 37,7    | 90,6 | 42,6         | 155,8   | 431,6 | 24,0         | 64,1    | 224,6 | 4,4          | 38,1    | 90,2 |
| 100          | 13,5       | 39,6    | 96,5 | 44,3         | 166,0   | 464,5 | 24,9         | 67,0    | 238,2 | 4,4          | 39,9    | 95,5 |

**Tabela 5-15 Frequência de ocorrência das PDMA atuais no futuro de longo prazo, cenário de emissão SSP5-8.5**

| TR<br>(Anos) | Cenário QU |         |      | Cenário FU |         |       | Cenário QS |         |      | Cenário FS |         |      |
|--------------|------------|---------|------|------------|---------|-------|------------|---------|------|------------|---------|------|
|              | Mín        | Mediana | Máx  | Mín        | Mediana | Máx   | Mín        | Mediana | Máx  | Mín        | Mediana | Máx  |
| 2            | 1,1        | 1,2     | 1,4  | 1,0        | 1,2     | 1,4   | 1,0        | 1,0     | 1,2  | 1,3        | 1,6     | 2,2  |
| 5            | 1,6        | 2,0     | 2,8  | 1,2        | 2,3     | 3,5   | 1,2        | 1,7     | 2,3  | 2,5        | 3,4     | 5,0  |
| 10           | 2,3        | 3,4     | 5,6  | 3,2        | 4,2     | 8,9   | 1,9        | 3,3     | 6,0  | 3,7        | 6,1     | 9,4  |
| 15           | 3,0        | 4,9     | 8,5  | 4,2        | 6,2     | 15,4  | 2,3        | 5,1     | 11,5 | 4,7        | 8,5     | 13,5 |
| 20           | 3,4        | 6,2     | 11,6 | 5,0        | 8,0     | 25,7  | 2,6        | 7,4     | 20,8 | 5,5        | 10,8    | 17,5 |
| 25           | 3,7        | 7,5     | 14,7 | 5,7        | 9,9     | 41,0  | 2,9        | 9,7     | 33,2 | 6,2        | 12,9    | 21,4 |
| 30           | 4,0        | 8,8     | 17,9 | 6,4        | 12,0    | 60,1  | 3,2        | 12,1    | 48,5 | 6,9        | 15,1    | 25,2 |
| 35           | 4,3        | 10,1    | 21,1 | 7,0        | 14,0    | 82,9  | 3,4        | 14,6    | 67,0 | 7,6        | 17,4    | 29,0 |
| 40           | 4,6        | 11,4    | 24,4 | 7,6        | 16,2    | 109,6 | 3,7        | 17,2    | 88,6 | 8,2        | 19,5    | 32,7 |

| TR<br>(Anos) | Cenário QU |         |      | Cenário FU |         |       | Cenário QS |         |       | Cenário FS |         |      |
|--------------|------------|---------|------|------------|---------|-------|------------|---------|-------|------------|---------|------|
|              | Mín        | Mediana | Máx  | Mín        | Mediana | Máx   | Mín        | Mediana | Máx   | Mín        | Mediana | Máx  |
| 45           | 4,8        | 12,8    | 27,8 | 8,2        | 18,2    | 140,3 | 3,9        | 19,9    | 113,3 | 8,8        | 21,7    | 36,4 |
| 50           | 5,1        | 14,1    | 31,1 | 8,7        | 20,2    | 174,8 | 4,1        | 22,9    | 141,2 | 9,4        | 23,8    | 40,0 |
| 55           | 5,3        | 15,4    | 34,5 | 9,3        | 22,2    | 213,3 | 4,3        | 26,2    | 172,3 | 9,9        | 25,7    | 43,6 |
| 60           | 5,5        | 16,8    | 37,9 | 9,8        | 24,2    | 255,8 | 4,5        | 29,7    | 206,7 | 10,5       | 27,7    | 47,1 |
| 65           | 5,7        | 18,1    | 41,4 | 10,3       | 26,2    | 302,4 | 4,7        | 33,0    | 244,3 | 11,0       | 29,6    | 50,6 |
| 70           | 5,9        | 19,4    | 44,9 | 10,8       | 28,2    | 352,9 | 4,8        | 36,0    | 285,2 | 11,5       | 31,5    | 54,1 |
| 75           | 6,1        | 20,7    | 48,4 | 11,3       | 30,2    | 407,6 | 5,0        | 39,1    | 329,4 | 12,0       | 33,4    | 57,6 |
| 80           | 6,3        | 22,1    | 51,9 | 11,8       | 32,2    | 466,3 | 5,2        | 42,2    | 376,9 | 12,4       | 35,3    | 61,1 |
| 85           | 6,4        | 23,4    | 55,4 | 12,2       | 34,1    | 529,1 | 5,3        | 45,4    | 427,7 | 12,9       | 37,1    | 64,5 |
| 90           | 6,6        | 24,7    | 59,0 | 12,7       | 36,1    | 596,1 | 5,5        | 48,5    | 481,9 | 13,3       | 39,0    | 67,9 |
| 95           | 6,8        | 26,0    | 62,6 | 13,1       | 36,1    | 253,7 | 5,7        | 51,8    | 539,4 | 13,8       | 40,8    | 71,3 |
| 100          | 6,9        | 27,3    | 66,2 | 13,5       | 38,0    | 276,0 | 5,8        | 54,3    | 412,5 | 14,2       | 42,6    | 74,6 |

Em termos gerais observa-se que os incrementos e diminuições das intensidades variam com o tempo de retorno e o cenário de emissão, no entanto, se percebe que quanto maior for o tempo de retorno, maiores são as alterações projetadas nas intensidades e nas frequências de ocorrência das PDMA. No apêndice 7, são apresentadas as alterações das intensidades máximas e mínimas projetadas em cada tempo de retorno, e no apêndice 6 é apresentado o comparativo entre as análises de frequência históricas e futuras.

Se percebe que não existe uniformidade nas tendências de incremento e diminuição projetadas em cada clima futuro no curto, médio e longo prazo, o qual deixa em evidência a variação temporal das condições pluviométricas medias projetadas.

A partir dos resultados apresentados anteriormente e ante as incertezas do futuro, é apropriado analisar as tendências de incremento e diminuição em cada um dos possíveis climas futuros, visto que como foi verificado por Nunes (2018), algumas estações tendem a apresentar alterações de tendências positivas, enquanto que outras apresentam tendências negativas. Assim nos próximos itens, serão apresentadas de forma mais detalhada as variações das PDMA nos três períodos futuros.

#### 5.4.1 Futuro Climático Quente Úmido

De forma geral, a ocorrência deste futuro climático geraria a diminuição das PDMA no curto prazo, enquanto no médio e longo termo, provocaria o seu incremento. A seguir, são apresentadas as alterações projetadas nas frequências de ocorrência no curto, médio e longo prazo.

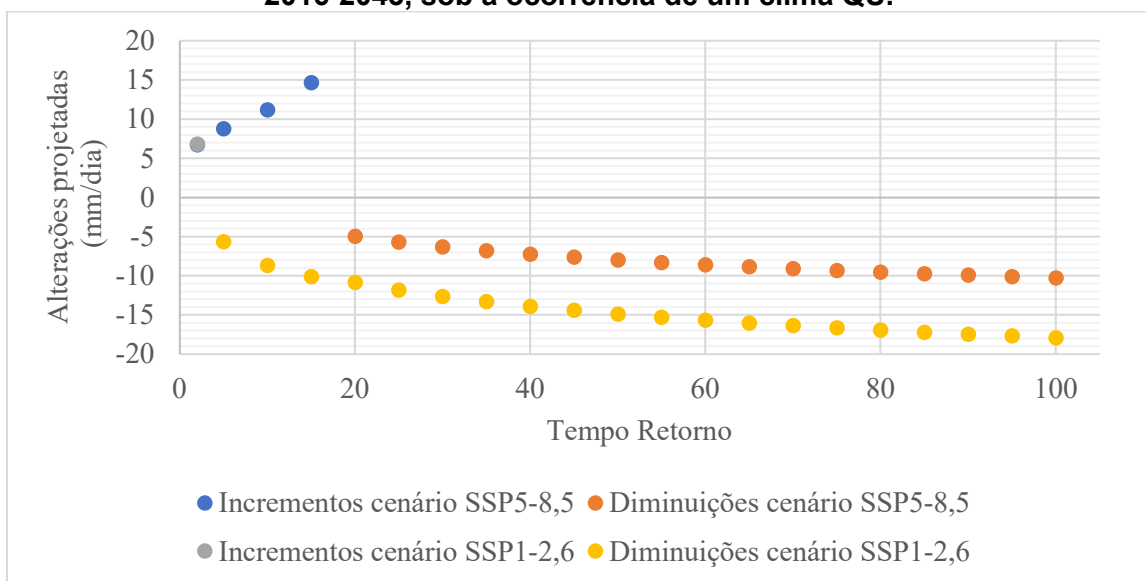
#### 5.4.1.1 Período 2016-2043

No cenário de emissão SSP1-2.6, aproximadamente 70% das estações avaliadas projetam a diminuição das intensidades das PDMA associadas a tempos de retorno superiores a 2 anos, enquanto, no tempo de retorno de 2 anos é projetado seu incremento. As diminuições e incrementos médios alcançam os 17,92 e 6,79 mm/dia, respectivamente.

De outra parte, no cenário SSP5-8.5, 61% das estações avaliadas projetam a diminuição das intensidades das PDMA associadas a tempos de retorno superiores a 15 anos, no caso de períodos de retorno de até 15 anos, são estimados incrementos. As diminuições e incrementos médios alcançam os 10,29 e 14 mm/dia respectivamente.

A seguir na Figura 5-29, são apresentados os incrementos e diminuições médias predominantes, em cada tempo de retorno e cenário de emissão.

**Figura 5-29 Alterações médias projetadas das precipitações diárias para o período 2016-2043, sob a ocorrência de um clima QU.**



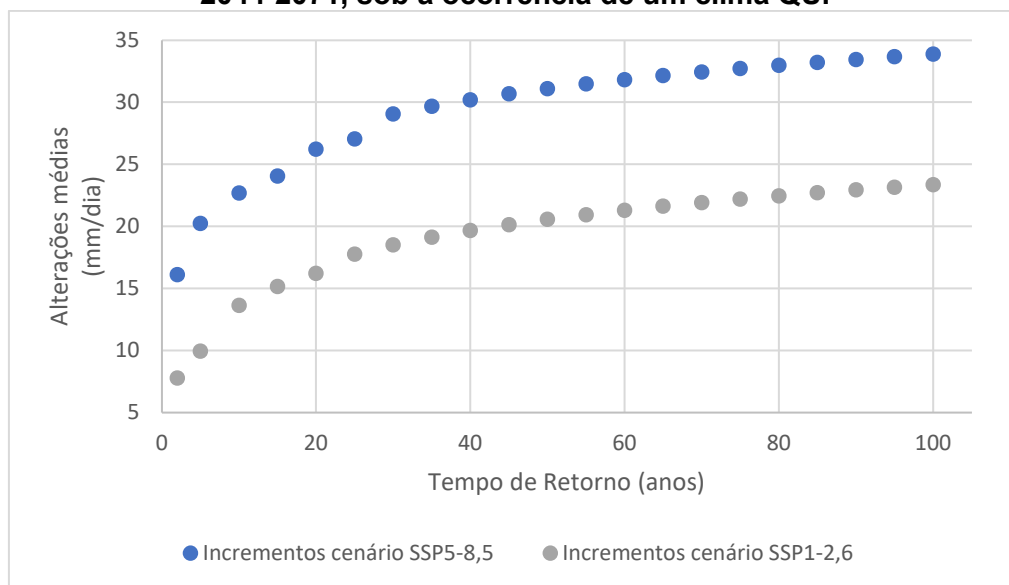
A partir da Figura 5-29 é possível perceber que, o cenário de emissão SSP1-2.6 projeta maiores diminuições das intensidades das PDMA que o cenário SSP5-8.5. Assim mesmo, diante do exposto se percebe que, sob a ocorrência de um clima futuro Quente-Úmido, existe uma predominância à diminuição das PDMA nos diferentes tempos de retorno.

#### 5.4.1.2 Período 2044-2071

Na maioria das estações são projetados incrementos das intensidades das PDMA associadas aos diferentes tempos de retorno, tanto no cenário de emissão SSP1-2.6 como no SSP5-8.5, que alcançam os 23,35 e 33,86 mm/dia respectivamente. A seguir na Figura 5-30, são apresentados os incrementos médios predominantes, em cada tempo de retorno e cenário de emissão.

A partir da Figura 5-30 é possível perceber que, o cenário de emissão SSP1-2.6 projeta menores incrementos das PDMA que o cenário SSP5-8.5. Assim mesmo, se percebe que no médio prazo, sob a ocorrência de um clima futuro Quente-Úmido, existe uma predominância de incremento das PDMA nos diferentes tempos de retorno.

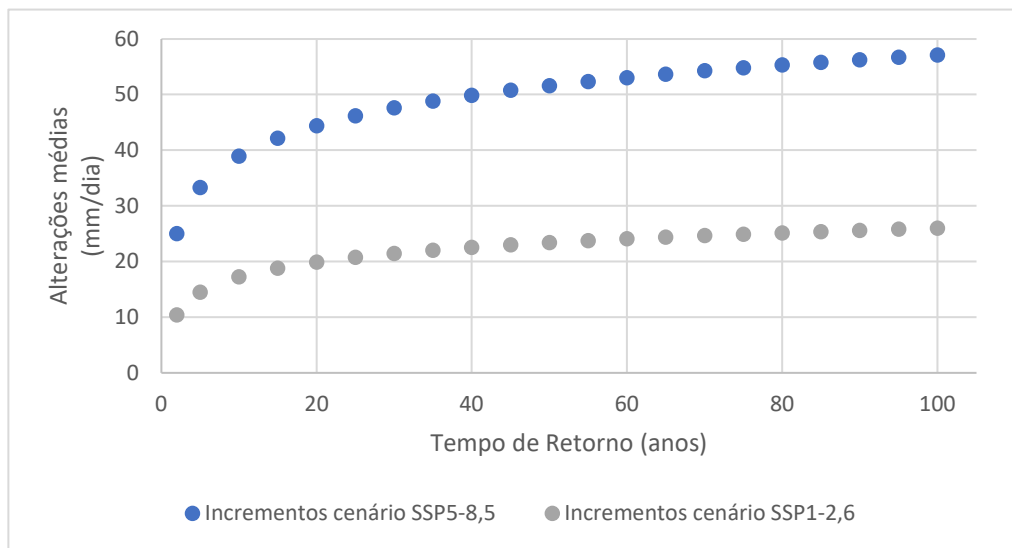
**Figura 5-30 Alterações médias projetadas das precipitações diárias para o período 2044-2071, sob a ocorrência de um clima QU.**



#### 5.4.1.3 Período 2072-2099

Neste período, todas as estações projetam incrementos das PDMA associadas aos diferentes tempos de retorno, tanto no cenário de emissão SSP1-2.6 como no SSP5-8.5, os quais atingem entre 25,98 e 57,07 mm/dia, respectivamente. A seguir na Figura 5-31, são apresentados os incrementos predominantes, em cada tempo de retorno e cenário de emissão.

**Figura 5-31 Alterações médias projetadas das precipitações diárias para o período 2072-2099, sob a ocorrência de um clima QU.**



A partir da Figura 5-31 é possível perceber que, da mesma que forma que ocorreu no médio prazo, o cenário de emissão SSP1-2.6 projeta menores incrementos das PDMA's que o cenário SSP5-8.5. Assim mesmo, se percebe a ocorrência de um clima futuro Quente-Úmido, geraria incrementos consideráveis nas PDMA's no longo termo.

#### 5.4.2 Futuro Climático Quente Seco

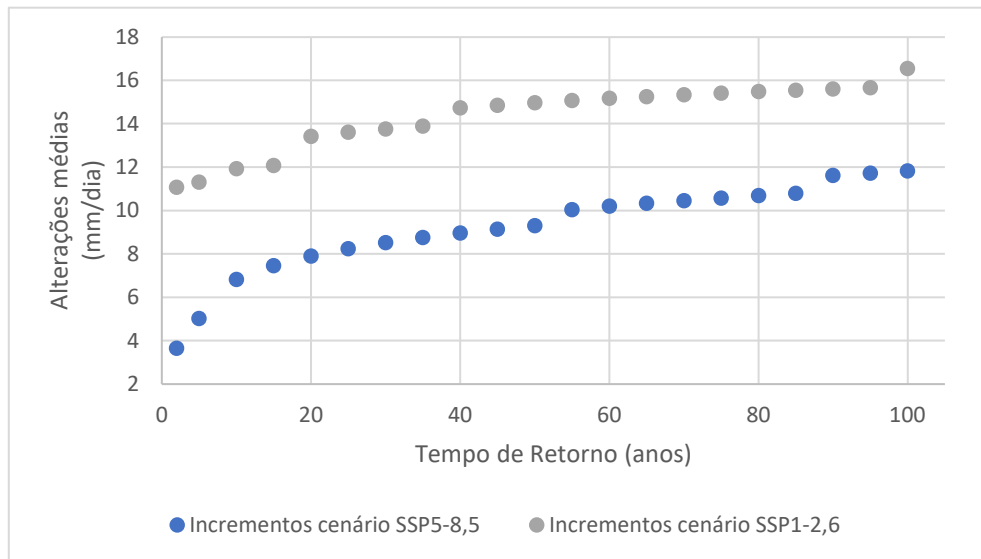
De forma geral, nos dois cenários de emissão a ocorrência de um futuro climático Quente-Seco geraria o incremento das PDMA's no curto prazo, que se mantem no caso do cenário de emissão SSP5-8.5 no médio e longo prazo. Enquanto para o cenário de emissão SSP1-2.6, são esperadas diminuições das PDMA's no médio e longo termo.

##### 5.4.2.1 Período 2016-2043

Nos cenários de emissão SSP1-2.6 e SSP5-8.5, 79% e 52% das estações avaliadas projetam incrementos de até 16,54 e 11,82 mm/dia, respectivamente, nas PDMA's em todos os tempos de retorno.

A seguir na Figura 5-32, são apresentados os incrementos predominantes, em cada tempo de retorno e cenário de emissão.

**Figura 5-32 Alterações médias projetadas das precipitações diárias para o período 2016-2043, sob a ocorrência de um clima QS.**



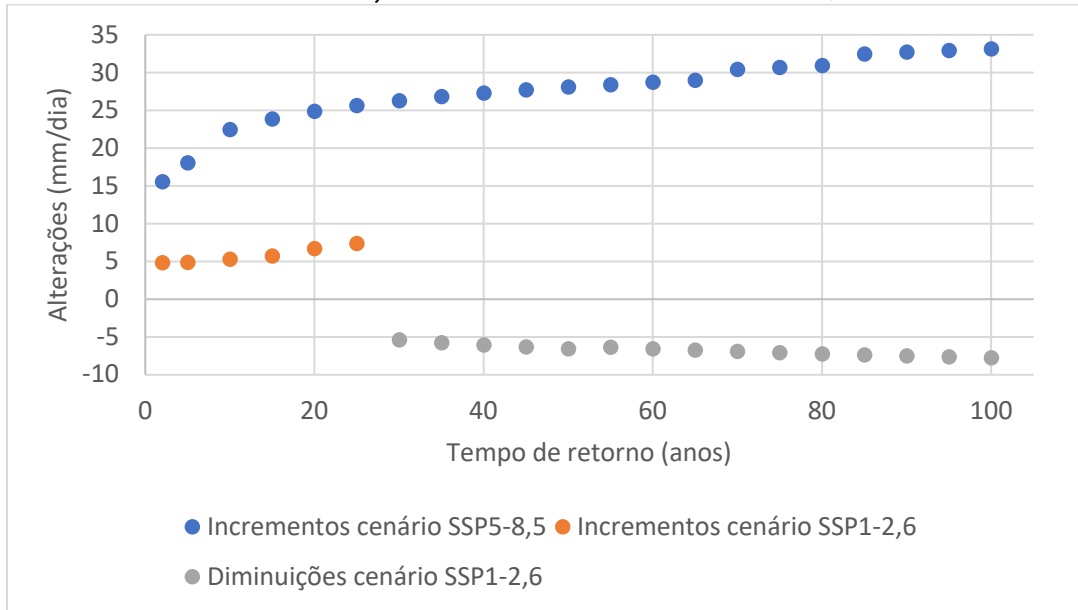
A partir da Figura 5-32 é possível perceber que no curto prazo, o cenário de emissão SSP1-2.6 projeta maiores incrementos das intensidades das PDMA que o cenário SSP5-8.5.

#### 5.4.2.2 Período 2044-2071

No cenário de emissão SSP1-2.6, 51% das estações avaliadas projetam a diminuição das PDMA associadas a tempos de retorno superiores a 25 anos, enquanto para tempos de retorno inferiores são projetados incrementos. As diminuições e incrementos médios alcançam os 7,77 e 7,37 mm/dia, respectivamente.

De outra parte no cenário SSP5-8.5, 82% das estações avaliadas projetam o incremento das PDMA em todos os tempos de retorno, os quais alcançam os 33,15 mm/dia. A seguir na Figura 5-33, são apresentados os incrementos e diminuições médias predominantes, em cada tempo de retorno e cenário de emissão.

**Figura 5-33 Alterações médias projetadas das precipitações diárias para o período 2044-2071, sob a ocorrência de um clima QS.**



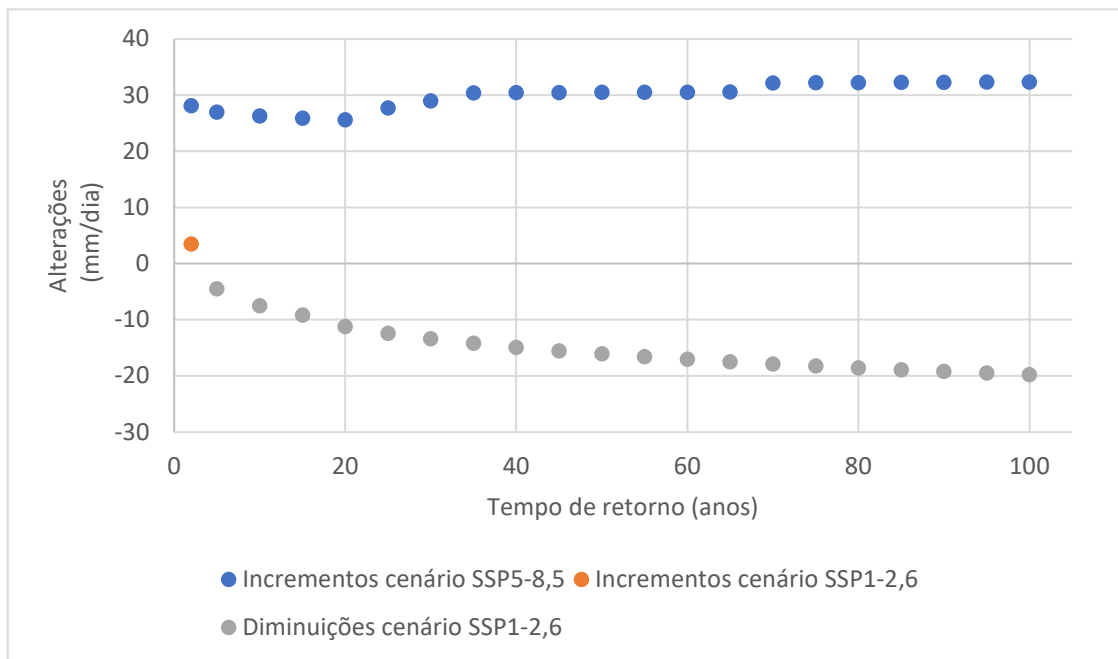
A partir da Figura 5-33 é possível perceber que, o cenário de emissão SSP5-8.5 projeta o incremento das PDMA's em todos os tempos de retorno, enquanto o cenário de emissão SSP1-2.6 projeta tanto incrementos quanto diminuições.

#### 5.4.2.3 Período 2072-2099

No cenário de emissão SSP1-26, 55% das estações avaliadas projetam a diminuição das PDMA's associadas a tempos de retorno superiores a 2 anos, enquanto para tempos de retorno de 2 anos é projetado o seu incremento. As diminuições e incrementos médios alcançam os 19,75 e 3,5 mm/dia, respectivamente.

De outra parte no cenário SSP5-8.5, 79% das estações avaliadas projetam o incremento das PDMA's em todos os tempos de retorno, os quais alcançam os 32,32 mm/dia. A seguir na Figura 5-33, são apresentados os incrementos e diminuições médias predominantes, em cada tempo de retorno e cenário de emissão.

**Figura 5-34 Alterações médias projetadas das precipitações diárias para o período 2072-2099, sob a ocorrência de um clima QS.**



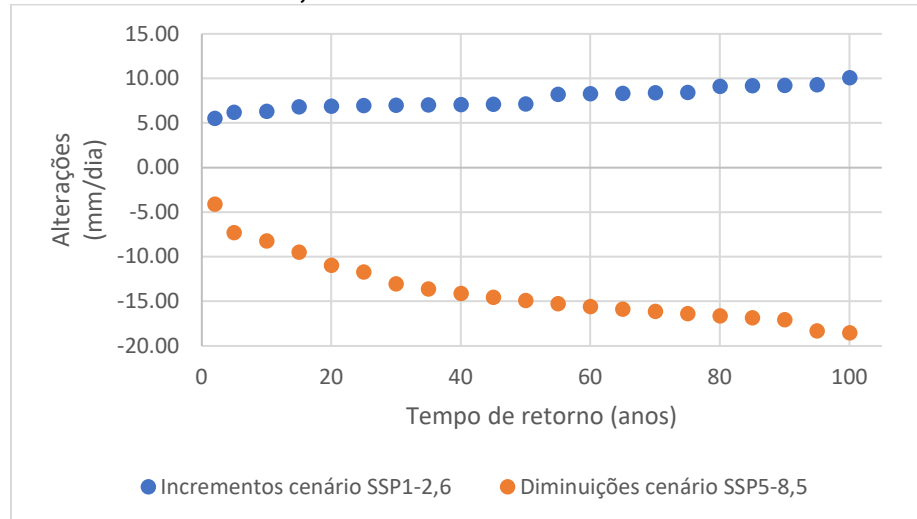
### 5.4.3 Futuro Climático Frio Úmido

Neste futuro climático, as alterações nas precipitações apresentam o mesmo comportamento no curto e médio prazo, é dizer, no cenário de emissão SSP1-2.6 são projetados incrementos das precipitações em todos os tempos de retorno, enquanto no SSP5-8.5 se projetam suas diminuições. Já no longo prazo, são projetados incrementos das precipitações tanto no cenário de emissão SSP1-2.6 como no SSP5-8.5.

#### 5.4.3.1 Período 2016-2043

No cenário de emissão SSP1-2,6, 55% das estações avaliadas projetam incrementos nas PDMA's associadas aos diferentes tempos de retorno, enquanto no cenário SSP5-8.5, 59% das estações analisadas projetam diminuições. Os incrementos e diminuições estimados alcançam respectivamente os 10 e 18,53 mm/dia. A seguir na Figura 5-35, são apresentados os incrementos predominantes projetados para cada tempo de retorno em cada cenário de emissão.

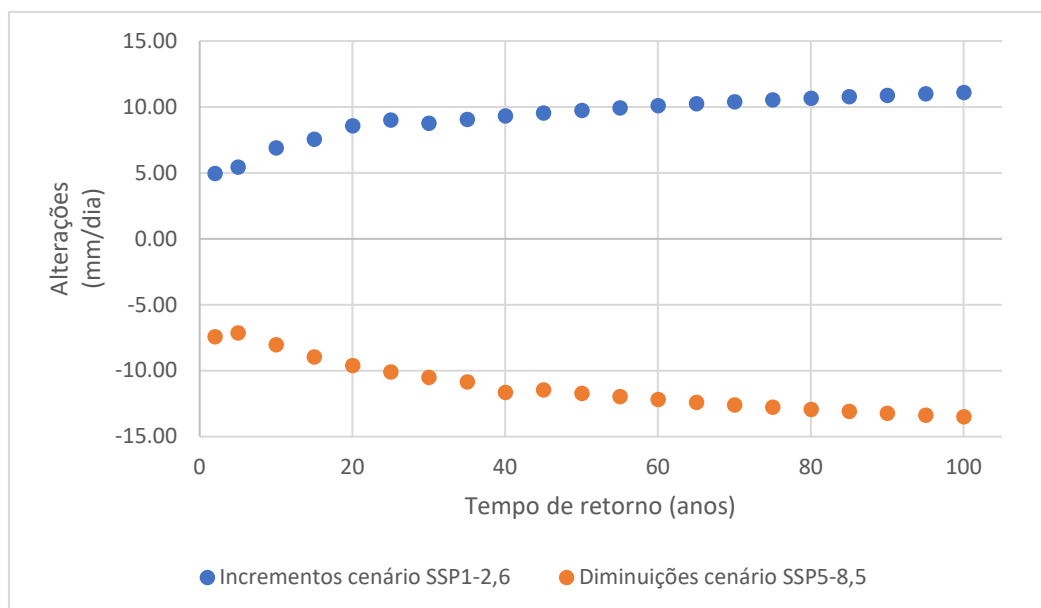
**Figura 5-35 Alterações médias projetadas das precipitações diárias para o período 2016-2043, sob a ocorrência de um clima FU.**



#### 5.4.3.2 Período 2044-2071

Neste período, as alterações das intensidades apresentam o mesmo comportamento do período 2016-2043, é dizer, no caso do cenário SSP1-2.6 é projetado o incremento das precipitações em todos os períodos de retorno, enquanto no cenário SSP5-8.5 são projetadas diminuições. Os incrementos e diminuições variam com o período de retorno, alcançando valores máximos de 11,1 e 13,49 mm/dia, respectivamente (Ver Figura 5-36).

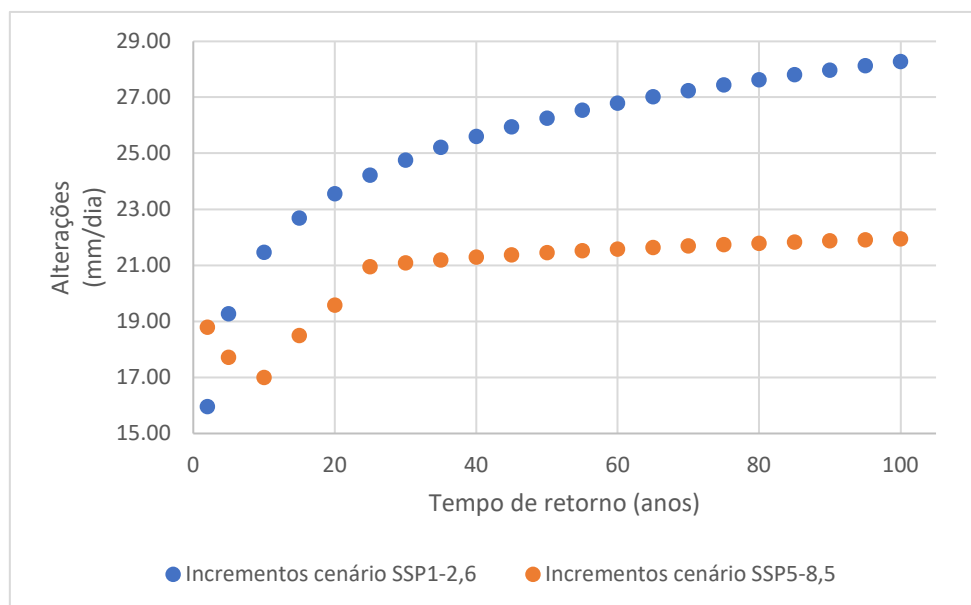
**Figura 5-36 Alterações médias projetadas das precipitações diárias para o período 2044-2071, sob a ocorrência de um clima FU.**



### 5.4.3.3 Período 2072-2099

Neste período, ambos cenários de emissão projetam incrementos das PDMA's em todos os períodos de retorno, que alcançam valores de 28,27 e 21,95 mm/dia, nos cenários de emissão SSP1-2.6 e SSP5-8.5 respectivamente (ver Figura 5-37).

**Figura 5-37 Alterações médias projetadas das precipitações diárias para o período 2072-2099, sob a ocorrência de um clima FU.**



### 5.4.4 Futuro Climático Frio Seco

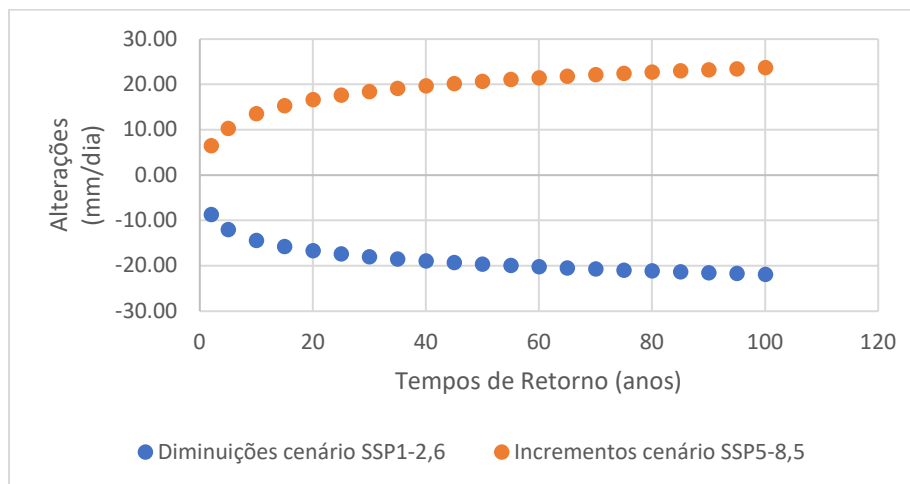
Neste futuro climático, as alterações nas precipitações apresentam o mesmo comportamento no curto e médio prazo, é dizer, no cenário de emissão SSP1-2.6 são projetados incrementos das intensidades em todos os tempos de retorno, enquanto no SSP5-8.5 se projetam diminuições. Já no longo prazo, são projetados incrementos das precipitações tanto no cenário de emissão SSP1-2.6 como no SSP5-8.5.

#### 5.4.4.1 Período 2016-2043

No cenário de emissão SSP1-2.6, 97% das estações avaliadas projetam diminuições das PDMA's associadas aos diferentes tempos de retorno, enquanto no cenário SSP5-8.5 72% das estações projetaram incrementos. Os incrementos e diminuições estimados alcançam,

respectivamente, 23, 66 e 21,88 mm/dia. A seguir na Figura 5-38, são apresentadas as alterações predominantes projetadas em cada tempo de retorno e em cada cenário de emissão.

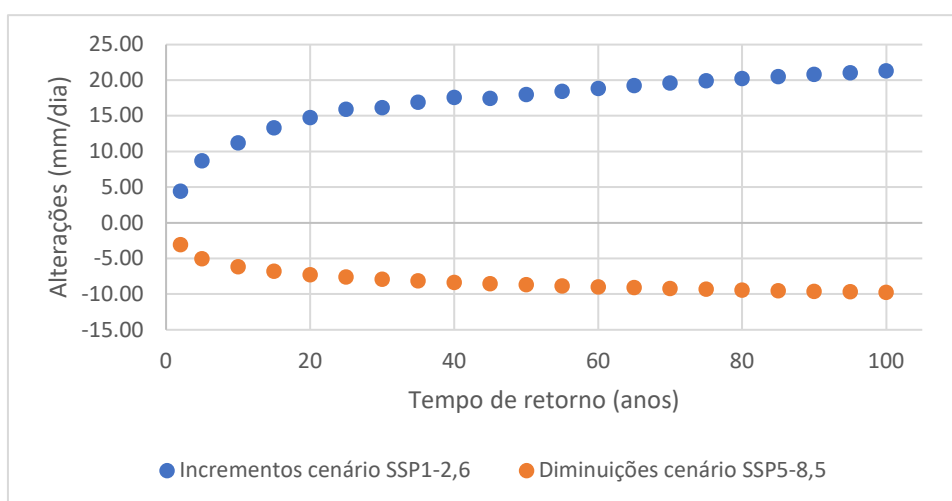
**Figura 5-38 Alterações médias projetadas das precipitações diárias para o período 2016-2043, sob a ocorrência de um clima FS.**



#### 5.4.4.2 Período 2044-2071

Para o cenário de emissão SSP1-26, 51,7% das estações avaliadas projetam incrementos nas intensidades das PDMA associadas aos diferentes tempos de retorno, enquanto no cenário SSP5-8.5 58% das estações projetaram diminuições. Os incrementos e diminuições estimados alcançam respectivamente os 21,32 e 9,72 mm/dia. A seguir na Figura 5-38, são apresentadas as alterações predominantes projetadas em cada tempo de retorno e em cada cenário de emissão.

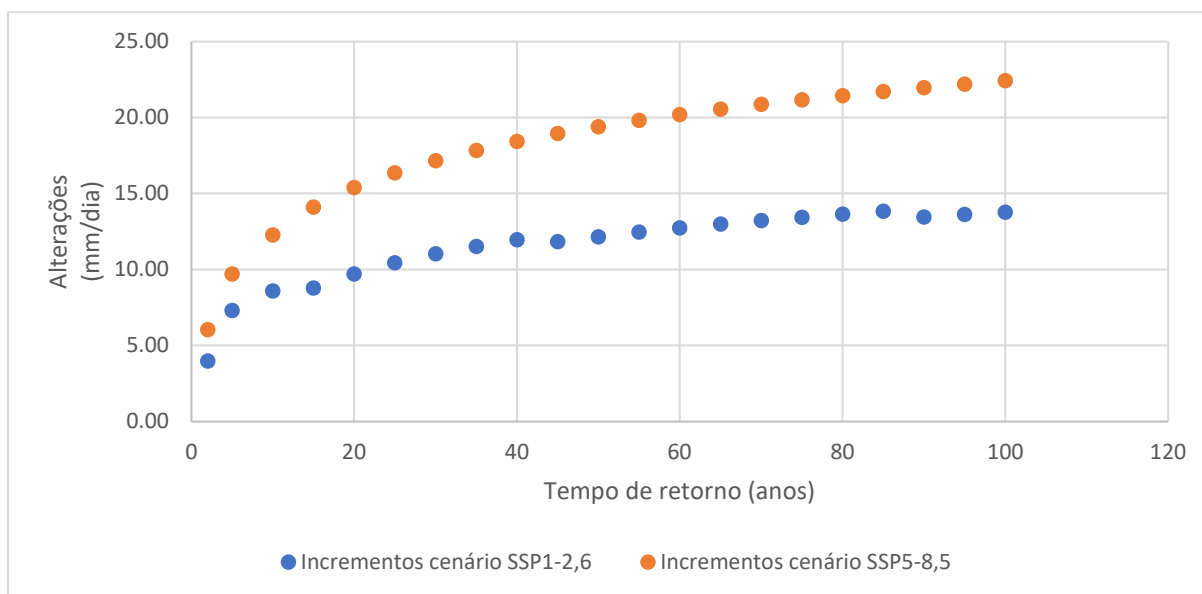
**Figura 5-39 Alterações médias projetadas das precipitações diárias para o período 2044-2071, sob a ocorrência de um clima FS.**



#### 5.4.4.3 Período 2072-2099

Neste período, ambos cenários de emissão projetam incrementos das precipitações em todos os períodos de retorno, que alcançam valores de 13,78 e 22,42 mm/dia, nos cenários de emissão SSP1-2.6 e SSP5-8.5, respectivamente (ver Figura 5-40).

**Figura 5-40 Alterações médias projetadas das precipitações diárias para o período 2072-2099, sob a ocorrência de um clima FS.**



## 6 CONCLUSÕES

A eleição das simulações do clima futuro é uma tarefa complexa, visto que cada uma delas pode chegar a projetar condições climáticas diferentes, que somado às incertezas e desconhecimento próprio do futuro, conduz a uma encruzilhada. Diante deste cenário, a melhor opção é trabalhar com o conjunto de simulações que projetem as maiores mudanças climáticas futuras, visto que desta forma poderá ser obtido o panorama geral das eventuais alterações que podem ocorrer.

No caso da RMBH, as simulações que projetam as maiores alterações das condições climáticas médias e extremas para o final do século XXI são: CMCC-ESM2-r1i1p1f1, EC-Earth3-r114i1p1f1, EC-Earth3-r122i1p1f1 e EC-Earth3-r126i1p1f1 no caso do cenário SSP1-2.6, e CMCC-ESM2-r1i1p1f1, EC-Earth3-r138i1p1f1, EC-Earth3-Veg-r2i1p1f1 e NorESM2-MM-r1i1p1f1 no caso do SSP5-8.5.

Considerando a impossibilidade dos MCG de representar adequadamente as características hidroclimatológicas locais de pequenas áreas, foram avaliadas 4 técnicas de redução de escala da precipitação diária, identificando que no caso da RMBH, as técnicas baseadas em AR resultam ser a melhor opção para o desenvolvimento de estudos que visem em identificar alterações na frequência de ocorrência das precipitações máximas diárias, num contexto de mudanças climáticas. Enquanto no caso dos estudos que visem em identificar alterações tanto do número de dias chuvosos como da precipitação total por ano hidrológico deverão ser analisados enfoques de *Downscaling* diferentes aos baseados em AR, PG, QQ e o Método Delta.

No curto, médio e longo prazo, em cada um dos quatro futuros climáticos avaliados (QU, QS, FU e FS) foi evidenciada a projeção tanto de incrementos como de diminuições das intensidades das PDMA, que variam conforme o tempo de retorno e o clima futuro. Levando em consideração a alta variabilidade das mudanças projetadas para os tempos de retorno superiores a 50 anos, se recomenda empregar com cautela as alterações projetadas nos tempos de retorno superiores a 50 anos.

Em relação às análises de frequência, foi percebido que, em termos gerais os Quantis de precipitação máxima diária projetados se encontram dentre os intervalos de confiança dos

Quantis históricos, não obstante, em alguns casos são projetados valores superiores e inferiores a estes. Assim mesmo, foi percebido que os incrementos e diminuições das intensidades projetadas em cada cenário de emissão variam com o tempo de retorno, não obstante, em termos gerais se percebe que quanto maior for o tempo de retorno, maiores são as alterações projetadas.

De outra parte, foi percebido que as diminuições projetadas tanto nos eventos extremos quanto nas condições climáticas médias, tendem a ser maiores que os incrementos projetados, apresentando coerência com os resultados obtidos por Almazroui *et al.* (2021).

De outro lado, no curto prazo (2016-2043), foi percebido que os incrementos das precipitações diárias por ano hidrológico poderiam estar entre 11,07 e 16,55 mm/dia, enquanto as diminuições se encontrariam entre 8,74 e 21,88 mm/dia, no cenário de emissão SSP1-2.6. Já no cenário SSP5-8.5, os incrementos se encontrariam entre 6,72 e 23,66 mm/dia, ao mesmo tempo que, as diminuições estariam entre 4,12 e 18,53 mm/dia. Enquanto às alterações nas frequências de ocorrência das PDMA, as análises desenvolvidas deixaram em evidência que, a magnitude e o intervalo de variabilidade seriam proporcionais ao tempo de retorno, e iriam depender do futuro climático avaliado. Desta forma e conforme o apresentado na seção 5.4, nos climas QU e FS do cenário de emissão SSP1-2.6 e QU, FU e QS do SSP5-8.5, são projetadas diminuições da frequência de ocorrência das PDMA, enquanto no futuro climático QS do Cenário SSP1-2.6 e FS do SSP5-8.5, são projetados incrementos.

No médio prazo (2044-2071), os aumentos das PDMA nos diferentes tempos de retorno do cenário SSP1-2.6, poderiam variar entre 7,76 e 23,36 mm/dia, enquanto as diminuições alcançariam 7,77 mm/dia. No caso do cenário SSP5-8.5, os incrementos se encontrariam entre os 16,10 e os 33,86 mm/dia, e as diminuições estariam entre os 7,12 e os 13,49 mm/dia. Da mesma forma que no curto prazo, evidenciou-se que a magnitude e o intervalo de variabilidade das alterações nas frequências de ocorrência das PDMA no médio prazo, seriam proporcionais ao tempo de retorno e iriam depender do futuro climático avaliado, desta forma, evidenciou-se que nos climas futuros QU e QS do cenário de emissão SSP5-8.5 poderiam se apresentar incrementos das frequências de ocorrências, enquanto que nos FU e FS se apresentariam diminuições, de outro lado, no cenário de emissão SSP1-2.6 foi evidenciada uma predominância de incrementos na frequência de ocorrência das PDMA.

Finalmente, no longo prazo (2072-2099), os incrementos das PDMA's nos diferentes tempos de retorno do cenário SSP1-2.6, poderiam variar entre 15,96 e 28,27 mm/dia, enquanto as diminuições se encontrariam entre 3,05 e 19,75 mm/dia. De outra parte, os incrementos das intensidades projetadas no cenário SSP5-8.5, se encontrariam entre os 0,94 e os 14,19 mm/dia. Enquanto às alterações nas frequências de ocorrência das PDMA no longo prazo, constatou-se que sob a ocorrência dos cenários de emissão SSP1-2.6 e SSP5-8.5, poderia apresentar-se uma predominância de incrementos das frequências de ocorrência das PDMA, no entanto, no caso do clima futuro QS do cenário de emissão SSP1-2.6 poderia existir uma predominância de diminuição da frequência de ocorrência das PDMA.

## 7 RECOMENDAÇÕES

Com intuito de consolidar ainda mais a identificação das possíveis alterações em contextos de mudanças climáticas na RMBH, se recomenda desenvolver trabalhos que visem em identificar alterações nas intensidades das precipitações no nível subdiário.

Levando em consideração a variação temporal das condições projetadas pelos modelos, se recomenda em estudos posteriores, selecionar modelos para cada um dos períodos de tempo avaliados, é dizer, se recomenda realizar seleções de modelos no curto, médio e longo prazo.

É recomendável desenvolver estudos empregando como registros históricos dados de reanalises como os de WorldClim, “*Global Precipitation Climatology Centre*” e “*Climatic research Unit*”.

Assim mesmo, se considera importante incluir os cenários de emissão desconsiderados no presente estudo, visto que isto poderia incrementar o entendimento da variabilidade climática que poderia se apresentar na RMBH.

## REFERÊNCIAS

- ACEVEDO, A. L. **Estimación Hidrológica Bajo Escenarios de Cambio Climático en Colombia**. Maestria.—Medellín: Universidad Nacional de Colombia., 2009.
- ALMAZROUI, M. et al. Assessment of CMIP6 Performance and Projected Temperature and Precipitation Changes Over South America. **Earth Systems and Environment**, v. 5, n. 2, p. 155–183, jun. 2021.
- AMBRIZZI, T. et al. The state of the art and fundamental aspects of regional climate modeling in South America: Climate modeling in South America. **Annals of the New York Academy of Sciences**, v. 1436, n. 1, p. 98–120, jan. 2019.
- APARICIO, M. F. **Fundamentos de Hidrologia de superficie**. [s.l.] Limusa, 1992.
- ARNBJERG-NIELSEN, K. Quantification of climate change effects on extreme precipitation used for high resolution hydrologic design. **Urban Water Journal**, v. 9, n. 2, p. 57–65, abr. 2012.
- AVILA-DIAZ, A. et al. Assessing current and future trends of climate extremes across Brazil based on reanalyses and earth system model projections. **Climate Dynamics**, v. 55, n. 5–6, p. 1403–1426, set. 2020.
- BAYAZIT, M. Nonstationarity of Hydrological Records and Recent Trends in Trend Analysis: A State-of-the-art Review. **Environmental Processes**, v. 2, n. 3, p. 527–542, set. 2015.
- CANNON, A. J.; SOBIE, S. R.; MURDOCK, T. Q. Bias Correction of GCM Precipitation by Quantile Mapping: How Well Do Methods Preserve Changes in Quantiles and Extremes? **Journal of Climate**, v. 28, n. 17, p. 6938–6959, 1 set. 2015.
- CARVAJAL-SERNA, L. F.; GRAJALES-CARDONA, D. Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia no estacionarias para la cuenca del río Medellín. **DYNA**, v. 86, n. 208, p. 321–328, 1 jan. 2019.
- CASTRO, M. **Los modelos climáticos globales**. . Em: PROYECCIÓN REGIONAL DE ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO. Universidad de Cantabria: 2007. Disponível em: <<https://docplayer.es/52693024-Cursos-de-verano-de-la-universidad-de-cantabria-proyeccion-regional-de-escenarios-de-cambio-climatico-tecnicas-y-proyectos-en-curso.html>>
- COULIBALY, P. Downscaling daily extreme temperatures with genetic programming. **Geophysical Research Letters**, v. 31, n. 16, p. L16203, 2004.
- ENAYATI, M. et al. Bias correction capabilities of quantile mapping methods for rainfall and temperature variables. **Journal of Water and Climate Change**, v. 12, n. 2, p. 401–419, 1 mar. 2021.
- ETCCDI. **Climate Change Indices - ETCCDI**. Disponível em: <[http://etccdi.pacificclimate.org/list\\_27\\_indices.shtml](http://etccdi.pacificclimate.org/list_27_indices.shtml)>. Acesso em: 24 fev. 2022.

FADHEL, S.; RICO-RAMIREZ, M. A.; HAN, D. Uncertainty of Intensity–Duration–Frequency (IDF) curves due to varied climate baseline periods. **Journal of Hydrology**, v. 547, p. 600–612, abr. 2017.

GOLKAR HAMZEE YAZD, H. et al. Prediction of climate variables by comparing the knearest neighbor method and MIROC5 outputs in an arid environment. **Climate Research**, v. 77, n. 2, p. 99–114, 21 fev. 2019.

GUPTA, H. V. et al. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. **Journal of Hydrology**, v. 377, n. 1–2, p. 80–91, out. 2009.

HASHMI, M. Z.; SHAMSELDIN, A. Y.; MELVILLE, B. W. Statistical downscaling of watershed precipitation using Gene Expression Programming (GEP). **Environmental Modelling & Software**, v. 26, n. 12, p. 1639–1646, dez. 2011.

HASSANZADEH, E.; NAZEMI, A.; ELSHORBAGY, A. Quantile-Based Downscaling of Precipitation Using Genetic Programming: Application to IDF Curves in Saskatoon. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 19, n. 5, p. 943–955, maio 2014.

HEO, J.-H. et al. Probability Distributions for a Quantile Mapping Technique for a Bias Correction of Precipitation Data: A Case Study to Precipitation Data Under Climate Change. **Water**, v. 11, n. 7, p. 1475, 16 jul. 2019.

HINCHLIFFE, M. et al. Modelling Chemical Process Systems Using a Multi-Gene Genetic Programming Algorithm. Em: **Late Breaking Papers at the Genetic Programming**. Stanford University, CA, USA: Stanford Bookstore, 1996. p. 56–65.

HOSKING, J. R. M. **Package “lmom”**. [s.l: s.n.].

HOSKING, J. R. M.; WALLIS, J. R. Some statistics useful in regional frequency analysis. **Water Resources Research**, v. 29, n. 1, p. 251, 1993.

HUTENGS, C.; VOHLAND, M. Downscaling land surface temperatures at regional scales with random forest regression. **Remote Sensing of Environment**, v. 178, p. 127–141, 1 jun. 2016.

IM, J. et al. Downscaling of AMSR-E soil moisture with MODIS products using machine learning approaches. **Environmental Earth Sciences**, v. 75, n. 15, p. 1120, 26 jul. 2016.

IPCC, I. P. ON C. C. **Climate Change 2007: Climate Change Impacts, adaptation and Vulnerability, Contribution of WG2 to AR4**. Cambridge: IPCC, fev. 2007. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/ar4-wg2-intro.pdf>>.

IPCC, I. P. ON C. C. **Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer, , 2014. Disponível em: <[https://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR\\_AR5\\_FINAL\\_full\\_wcover.pdf](https://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf)>. Acesso em: 22 jul. 2020

- IPCC, I. P. ON C. C. **What is a GCM?** Disponível em: <[https://www.ipcc-data.org/guidelines/pages/gcm\\_guide.html](https://www.ipcc-data.org/guidelines/pages/gcm_guide.html)>. Acesso em: 25 fev. 2022.
- ITURBIDE, M. et al. Repository supporting the implementation of FAIR principles in the IPCC-WG1 Atlas. 2021.
- KHALID, I. A.; SITANGGANG, I. S. Machine Learning-Based Spatial Downscaling on Precipitation Satellite Data in Riau Province, Indonesia. p. 10, 2022.
- KOZA, J. R. **Genetic Programming II: Automatic Discovery of Reusable Programs**. 1. ed. MIT Press: [s.n.]. v. 1
- LI, C. et al. Changes in Annual Extremes of Daily Temperature and Precipitation in CMIP6 Models. **Journal of Climate**, v. 34, n. 9, p. 3441–3460, 1 maio 2021.
- LI, H.; SHEFFIELD, J.; WOOD, E. F. Bias correction of monthly precipitation and temperature fields from Intergovernmental Panel on Climate Change AR4 models using equidistant quantile matching. **Journal of Geophysical Research**, v. 115, n. D10, p. D10101, 18 maio 2010.
- LIU, W. et al. Quantifying the effects of climate change on hydrological regime and stream biota in a groundwater-dominated catchment: A modelling approach combining SWAT-MODFLOW with flow-biota empirical models. **Science of The Total Environment**, v. 745, p. 140933, nov. 2020.
- LLNL. **PCMDI - Historia**. Disponível em: <<https://pcmdi.llnl.gov/mips/cmip5/history.html>>. Acesso em: 24 fev. 2022.
- LOH, W. Classification and regression trees. **WIREs Data Mining and Knowledge Discovery**, v. 1, n. 1, p. 14–23, jan. 2011.
- LUTZ, A. F. et al. Selecting representative climate models for climate change impact studies: an advanced envelope-based selection approach: ADVANCED ENVELOPE-BASED CLIMATE MODEL SELECTION APPROACH. **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 12, p. 3988–4005, out. 2016.
- MAMOON, A. A. et al. Design rainfall in Qatar: sensitivity to climate change scenarios. **Natural Hazards**, v. 81, n. 3, p. 1797–1810, abr. 2016.
- MANN, H. B.; WHITNEY, D. R. On the test of whether one of random variables is stochastically larger than the other. **Annals of Mathematical Statistics**, 1947.
- MEHR, D. A.; NOURANI, V. Season Algorithm-Multigene Genetic Programming: A New Approach for Rainfall-Runoff Modelling. **Water Resources Management**, v. 32, n. 8, p. 2665–2679, jun. 2018.
- MILLY, P. C. D. et al. Stationarity Is Dead: Whither Water Management? **Science**, v. 319, n. 5863, p. 573–574, 1 fev. 2008.
- MILLY, P. C. D. et al. On Critiques of “Stationarity is Dead: Whither Water Management?”: On Critiques of “Stationarity is Dead: Whither Water Management?” **Water Resources Research**, v. 51, n. 9, p. 7785–7789, set. 2015.

MIRHOSSEINI, G.; SRIVASTAVA, P.; STEFANOVA, L. The impact of climate change on rainfall Intensity–Duration–Frequency (IDF) curves in Alabama. **Regional Environmental Change**, v. 13, n. S1, p. 25–33, ago. 2013.

MONTANARI, A.; KOUTSOYIANNIS, D. Modeling and mitigating natural hazards: Stationarity is immortal! **Water Resources Research**, v. 50, n. 12, p. 9748–9756, dez. 2014.  
NAGHETTINI, M.; PINTO, É. J. **Hidrologia Estatística**. [s.l.] CPRM, 2007.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. **River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles - ScienceDirect**. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)>. Acesso em: 25 jul. 2020.  
NERC, N. E. R. C. **Flood Studies Report**, 1975.

NOVER, D. M. et al. The Effects of Downscaling Method on the Variability of Simulated Watershed Response to Climate Change in Five U.S. Basins. **Earth Interactions**, v. 20, n. 11, p. 1–27, 1 abr. 2016.

NUNES, D. A. A. **Tendências em eventos extremos de precipitação na Região Metropolitana de Belo Horizonte: Detecção, Impactos e Adaptabilidade**. Tese—Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2018.

OLSSON, J. et al. Hydrological Climate Change Impact Assessment at Small and Large Scales: Key Messages from Recent Progress in Sweden. **Climate**, v. 4, n. 3, p. 39, 24 ago. 2016.

O'NEILL, B. C. et al. **The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6**. [s.l.] Climate and Earth System Modeling, 22 abr. 2016. Disponível em: <<https://gmd.copernicus.org/preprints/gmd-2016-84/gmd-2016-84.pdf>>. Acesso em: 25 fev. 2022.

POUTEAU, R. et al. Downscaling MODIS-derived maps using GIS and boosted regression trees: The case of frost occurrence over the arid Andean highlands of Bolivia. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 1, p. 117–129, 17 jan. 2011.

RIAHI, K. et al. The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. **Global Environmental Change**, v. 42, p. 153–168, set. 2016.

ROCA, V., B.; BELTRÁN, S. M.; GÓMEZ, H. R. Cambio climático y salud. **Revista Clínica Española**, v. 219, n. 5, p. 260–265, jun. 2019.

RODRÍGUEZ, R. et al. Influence of climate change on IDF curves for the metropolitan area of Barcelona (Spain): INFLUENCE OF CLIMATE CHANGE ON IDF CURVES OF BARCELONA (SPAIN). **International Journal of Climatology**, v. 34, n. 3, p. 643–654, 15 mar. 2014.

SACHINDRA, D. A. et al. Statistical downscaling of general circulation model outputs to precipitation—part 2: bias-correction and future projections. **International Journal of Climatology**, v. 34, n. 11, p. 3282–3303, set. 2014.

SACHINDRA, D. A. et al. Cautionary note on the use of genetic programming in statistical downscaling. **International Journal of Climatology**, v. 38, n. 8, p. 3449–3465, jun. 2018a.  
 SACHINDRA, D. A. et al. Statistical downscaling of precipitation using machine learning techniques. **Atmospheric Research**, v. 212, p. 240–258, nov. 2018b.

SALEHNIA, N. et al. Comparing the Performance of Dynamical and Statistical Downscaling on Historical Run Precipitation Data over a Semi-Arid Region. **Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences**, v. 55, n. 4, p. 737–749, nov. 2019.

SALEHNIA, N. et al. Rainfed wheat (*Triticum aestivum* L.) yield prediction using economical, meteorological, and drought indicators through pooled panel data and statistical downscaling. **Ecological Indicators**, v. 111, p. 105991, 1 abr. 2020.

SEARSON, D. **Genetic programming & symbolic regression for MATLAB**. User guide, , 2010.

SHAHABUL ALAM, MD.; ELSHORBAGY, A. Quantification of the climate change-induced variations in Intensity–Duration–Frequency curves in the Canadian Prairies. **Journal of Hydrology**, v. 527, p. 990–1005, ago. 2015.

SILLMANN, J. et al. Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 1. Model evaluation in the present climate. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 118, n. 4, p. 1716–1733, 27 fev. 2013.

SUNG, J. H. et al. Assessment of Climate Change Impacts on Extreme Precipitation Events: Applications of CMIP5 Climate Projections Statistically Downscaled over South Korea. **Advances in Meteorology**, v. 2018, p. 1–12, 23 out. 2018.

TAYE, M. T.; WILLEMS, P. Influence of downscaling methods in projecting climate change impact on hydrological extremes of upper Blue Nile basin. 2013.

TAYLOR, K. E.; STOUFFER, R. J.; MEEHL, G. A. A Summary of the CMIP5 Experiment Design. **CMIP5 - Experiment Design - Design Document**, v. 1, n. 1, 2009.

ULLAH, A. et al. Prediction of effective climate change indicators using statistical downscaling approach and impact assessment on pearl millet (*Pennisetum glaucum* L.) yield through Genetic Algorithm in Punjab, Pakistan - ScienceDirect. **Ecological Indicators**, p. 569–576, 2018.

UNSW. **Climdex**. Disponível em: <<https://www.climdex.org/learn/indices/>>. Acesso em: 13 jul. 2021.

WALD, A.; WOLFOWITZ, J. An Exact Test for Randomness in the Non-Parametric Case Based on Serial Correlation. **The Annals of Mathematical Statistics**, v. 14, n. 4, p. 378–388, dez. 1943.

WANG, L. et al. Comparison of empirical statistical methods for downscaling daily climate projections from CMIP5 GCMs: a case study of the Huai River Basin, China: COMPARING EMPIRICAL STAISTITCAL DOWNSCALING METHODS. **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 1, p. 145–164, jan. 2016.

WATERS, D. et al. Adaptation of a Storm Drainage System to Accommodate Increased Rainfall Resulting from Climate Change. **Journal of Environmental Planning and Management**, v. 46, n. 5, p. 755–770, set. 2003.

WESCHENFELDER, A. B. et al. Geração de Curvas IDF's para Cenários Projetados na Cidade de Porto Alegre/RS. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 34, n. 2, p. 201–216, jun. 2019.

WORKU, G. et al. Modelling hydrological processes under climate change scenarios in the Jemma sub-basin of upper Blue Nile Basin, Ethiopia. **Climate Risk Management**, v. 31, p. 100272, 2021.

XU, C. From GCMs to river flow: a review of downscaling methods and hydrologic modelling approaches. **Progress in Physical Geography: Earth and Environment**, v. 23, n. 2, p. 229–249, jun. 1999.

XU, Z.; HAN, Y.; YANG, Z. Dynamical downscaling of regional climate: A review of methods and limitations. **Science China Earth Sciences**, v. 62, n. 2, p. 365–375, fev. 2019.  
ZHANG, X.; YANG, F. **RCLimdex (1.0) User Manual**. Ontario Canada, 2004.

## APÊNDICE 1: COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO DAS ESTAÇÕES EMPREGADAS COMO APOIOS

| Estação Analisada | Ano Inicial | Ano Final | Corr 1 | Corr 2 | Corr 3 | Corr 4 | Corr 5 | Corr 6 | Corr 7 | Corr 8 | Corr 9 | Corr 10 | Corr 11 | Corr 12 | Corr 13 | Corr 14 | Corr 15 |
|-------------------|-------------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 01943000          | 1976        | 2018      | 0,8    | 0,9    | 0,7    | 0,8    | 0,7    | 0,7    | 0,7    |        |        |         |         |         |         |         |         |
| 01943004          | 1972        | 2018      | 0,8    | 0,7    | 0,7    |        |        |        |        |        |        |         |         |         |         |         |         |
| 01943006          | 1976        | 2018      | 0,8    |        |        |        |        |        |        |        |        |         |         |         |         |         |         |
| 01943009          | 1972        | 2018      | 0,8    | 0,8    | 0,7    | 0,7    | 0,7    | 0,7    | 0,7    | 0,7    | 0,8    |         |         |         |         |         |         |
| 01943010          | 1976        | 2018      | 0,7    | 0,7    | 0,7    | 0,8    | 0,8    | 0,7    | 0,8    | 0,7    | 0,8    | 0,8     |         |         |         |         |         |
| 01943022          | 1976        | 2018      | 0,9    | 0,8    | 0,8    | 0,7    | 0,7    | 0,7    |        |        |        |         |         |         |         |         |         |
| 01943024          | 1972        | 2018      | 0,8    | 0,8    | 0,7    | 0,7    | 0,8    |        |        |        |        |         |         |         |         |         |         |
| 01943042          | 1999        | 2019      | 0,9    |        |        |        |        |        |        |        |        |         |         |         |         |         |         |
| 01943049          | 1972        | 2018      | 0,8    |        |        |        |        |        |        |        |        |         |         |         |         |         |         |
| 01943055          | 1976        | 2018      | 0,9    | 0,9    | 0,9    | 0,8    | 0,8    | 0,7    | 0,8    | 0,8    | 0,7    | 0,9     | 0,8     |         |         |         |         |
| 01944004          | 1988        | 2019      | 0,8    | 0,8    | 0,9    | 0,8    | 0,8    |        |        |        |        |         |         |         |         |         |         |
| 01944007          | 1988        | 2019      | 0,8    | 0,7    | 0,7    | 0,8    | 0,8    | 0,7    | 0,8    |        |        |         |         |         |         |         |         |
| 01944009          | 1972        | 2018      | 0,8    |        |        |        |        |        |        |        |        |         |         |         |         |         |         |
| 01944026          | 1988        | 2019      | 0,9    | 0,8    | 0,7    | 0,9    | 0,7    | 0,8    | 0,8    | 0,7    | 0,9    |         |         |         |         |         |         |
| 01944027          | 1988        | 2019      | 0,8    | 0,8    | 0,7    | 0,9    | 0,7    | 0,7    | 0,8    |        |        |         |         |         |         |         |         |
| 01944055          | 1988        | 2018      | 0,7    | 0,8    | 0,8    | 0,8    | 0,7    | 0,7    | 0,9    | 0,7    | 0,7    | 0,7     | 0,7     | 0,7     | 0,8     | 0,7     |         |
| 01944062          | 1988        | 2019      | 0,8    | 0,9    | 0,9    | 0,8    | 0,8    | 0,8    | 0,7    | 0,8    |        |         |         |         |         |         |         |
| 02043002          | 1976        | 2018      | 0,9    | 0,8    | 0,8    | 0,8    | 0,7    | 0,7    | 0,7    | 0,8    |        |         |         |         |         |         |         |
| 02043004          | 1976        | 2018      | 0,9    | 0,8    | 0,8    | 0,8    | 0,7    | 0,8    |        |        |        |         |         |         |         |         |         |
| 02043042          | 1976        | 2018      | 0,9    | 0,9    | 0,9    | 0,8    | 0,8    | 0,8    | 0,8    |        |        |         |         |         |         |         |         |
| 02043043          | 1986        | 2018      | 0,8    | 0,8    | 0,9    | 0,9    | 0,7    | 0,7    | 0,8    | 0,7    | 0,8    | 0,8     | 0,8     |         |         |         |         |
| 02044008          | 1987        | 2018      | 0,7    |        |        |        |        |        |        |        |        |         |         |         |         |         |         |

| <b>Estação Analisada</b> | <b>Ano Inicial</b> | <b>Ano Final</b> | <b>Corr 1</b> | <b>Corr 2</b> | <b>Corr 3</b> | <b>Corr 4</b> | <b>Corr 5</b> | <b>Corr 6</b> | <b>Corr 7</b> | <b>Corr 8</b> | <b>Corr 9</b> | <b>Corr 10</b> | <b>Corr 11</b> | <b>Corr 12</b> | <b>Corr 13</b> | <b>Corr 14</b> | <b>Corr 15</b> |
|--------------------------|--------------------|------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 02044012                 | 1987               | 2018             | 0,9           | 0,8           | 0,8           | 0,8           | 0,8           | 0,8           | 0,9           | 0,7           | 0,8           | 0,8            | 0,8            | 0,8            | 0,8            | 0,7            | 0,8            |
| 02044016                 | 1988               | 2019             | 0,7           | 0,7           |               |               |               |               |               |               |               |                |                |                |                |                |                |
| 02044019                 | 1988               | 2019             | 0,7           | 0,9           | 0,8           | 0,8           | 0,8           | 0,9           | 0,8           | 0,8           | 0,7           |                |                |                |                |                |                |
| 02044020                 | 1988               | 2019             | 0,7           | 0,7           | 0,9           | 0,8           | 0,8           | 0,7           | 0,7           | 0,7           |               |                |                |                |                |                |                |
| 02044021                 | 1988               | 2019             | 0,9           | 0,9           | 0,8           | 0,8           | 0,9           | 0,9           | 0,7           | 0,7           | 0,8           | 0,8            | 0,8            |                |                |                |                |
| 02044024                 | 1988               | 2019             | 0,8           | 0,8           | 0,9           | 0,9           | 0,9           | 0,8           | 0,8           | 0,7           | 0,8           | 0,8            | 0,8            | 0,7            | 0,8            | 0,7            |                |
| 02044043                 | 1988               | 2019             | 0,8           | 0,8           | 0,7           | 0,9           | 0,8           | 0,7           | 0,7           |               |               |                |                |                |                |                |                |
| 02044052                 | 1988               | 2019             | 0,8           | 0,9           | 0,9           | 0,7           | 0,7           | 0,9           | 0,8           | 0,9           | 0,8           | 0,8            | 0,8            | 0,8            | 0,8            |                |                |
| 02044053                 | 1988               | 2019             | 0,8           | 0,8           | 0,7           | 0,8           | 0,7           | 0,9           | 0,8           |               |               |                |                |                |                |                |                |
| 02044054                 | 1988               | 2019             | 0,9           | 0,9           | 0,9           | 0,7           | 0,8           | 0,8           | 0,8           | 0,9           | 0,8           | 0,7            | 0,8            |                |                |                |                |

Corr: Coeficiente de correlação linear de Pearson da estação i

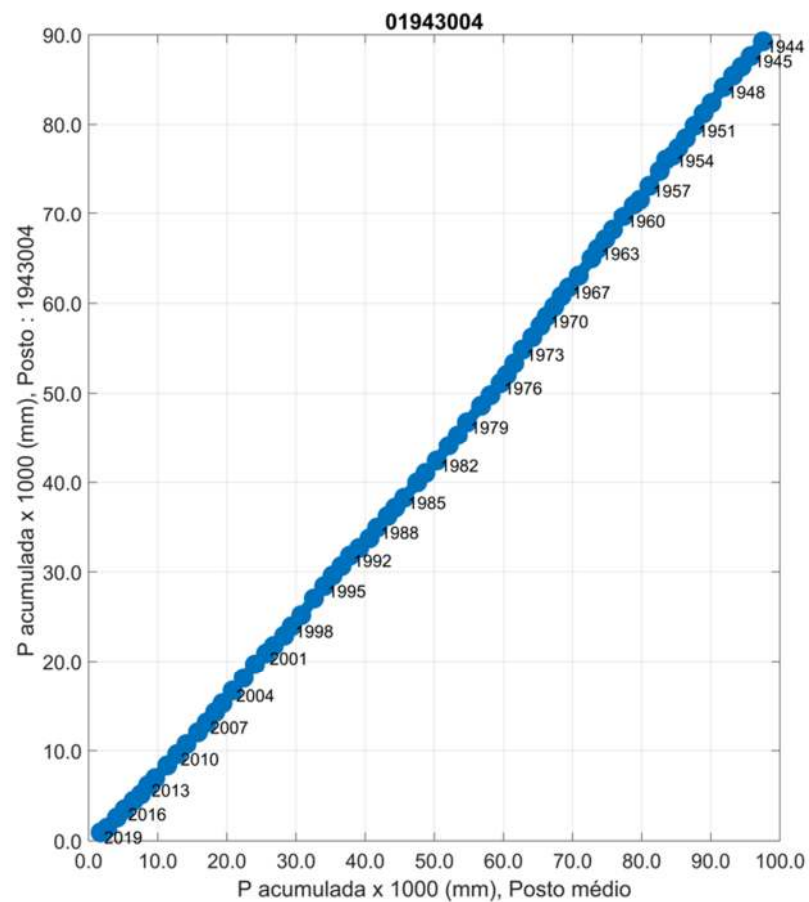
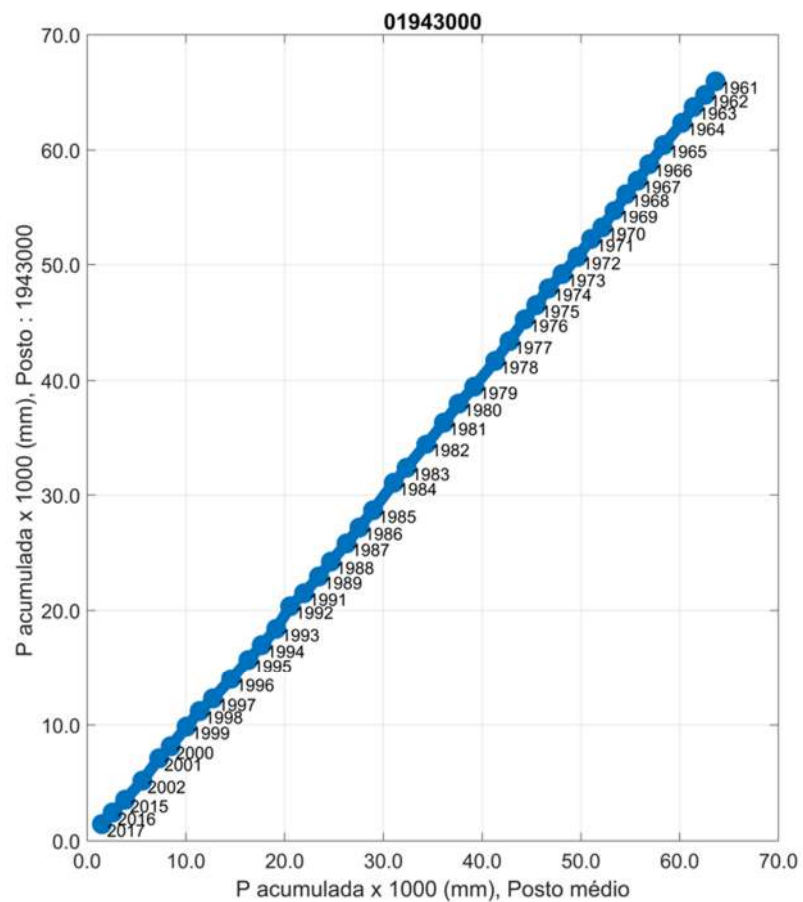
## APÊNDICE 1.1: ESTAÇÕES EMPREGADAS COMO APOIOS

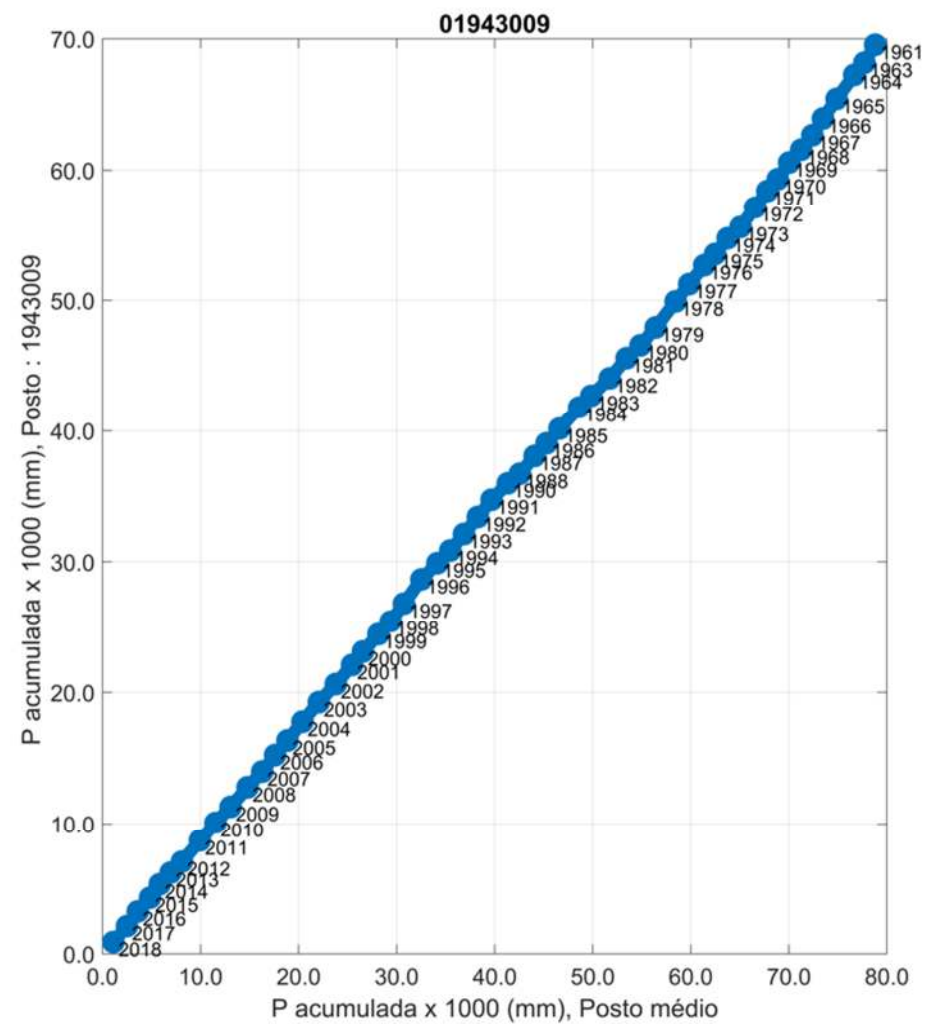
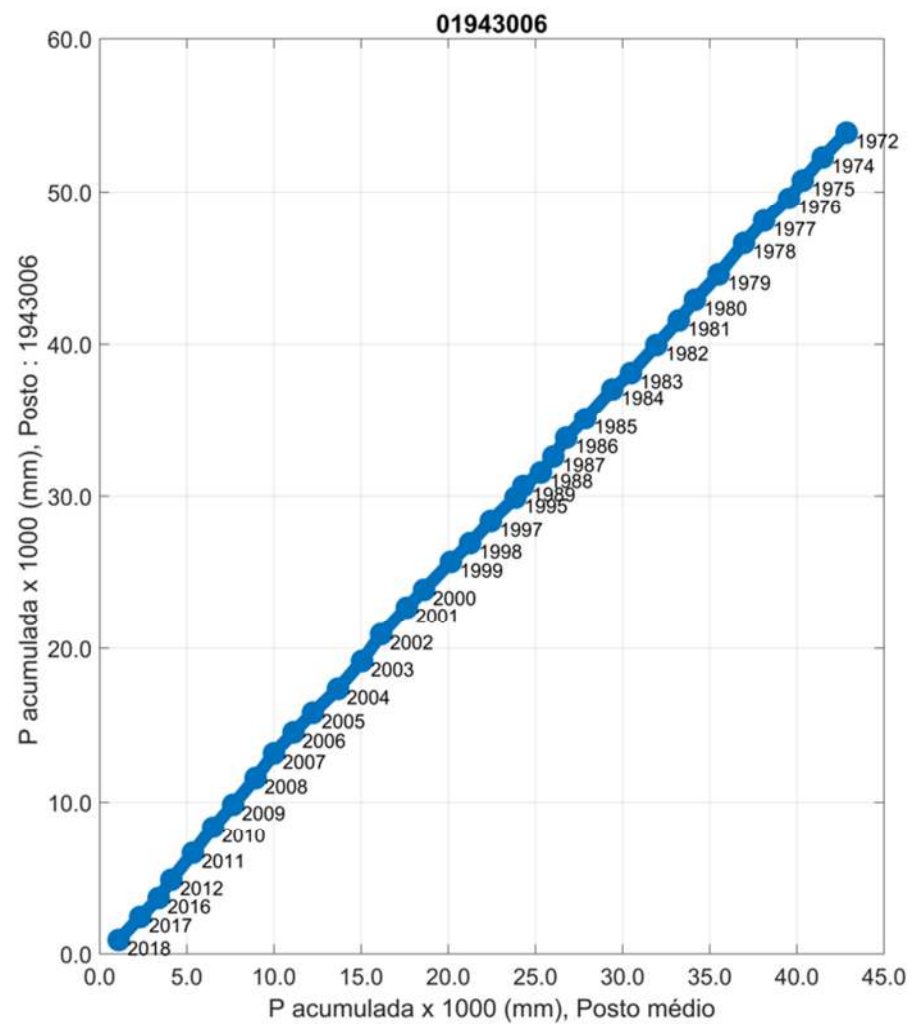
| <b>Estação<br/>Analisada</b> | <b>Est.<br/>Próx 1</b> | <b>Est.<br/>Próx 2</b> | <b>Est.<br/>Próx 3</b> | <b>Est.<br/>Próx 4</b> | <b>Est.<br/>Próx 5</b> | <b>Est.<br/>Próx 6</b> | <b>Est.<br/>Próx 7</b> | <b>Est.<br/>Próx 8</b> | <b>Est.<br/>Próx 9</b> | <b>Est.<br/>Próx 10</b> | <b>Est.<br/>Próx 11</b> | <b>Est.<br/>Próx 12</b> | <b>Est.<br/>Próx 13</b> | <b>Est.<br/>Próx 14</b> | <b>Est.<br/>Próx 15</b> |
|------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 1943000                      | 1943022                | 1943055                | 1943010                | 2044012                | 1944055                | 2044008                | 1943024                |                        |                        |                         |                         |                         |                         |                         |                         |
| 1943004                      | 1943024                | 1943009                | 1943010                |                        |                        |                        |                        |                        |                        |                         |                         |                         |                         |                         |                         |
| 1943006                      | 1943049                |                        |                        |                        |                        |                        |                        |                        |                        |                         |                         |                         |                         |                         |                         |
| 1943009                      | 1944009                | 1943055                | 1943006                | 1943004                | 1943022                | 1943010                | 1943024                | 2044012                | 1944055                |                         |                         |                         |                         |                         |                         |
| 1943010                      | 1943000                | 1943024                | 1943022                | 1943055                | 2043004                | 1943009                | 2043042                | 2043043                | 1943004                | 2043002                 |                         |                         |                         |                         |                         |
| 1943022                      | 1943055                | 1943000                | 2044012                | 2043043                | 1943010                | 1944055                |                        |                        |                        |                         |                         |                         |                         |                         |                         |
| 1943024                      | 1943010                | 1943004                | 1943009                | 1943000                | 1943055                |                        |                        |                        |                        |                         |                         |                         |                         |                         |                         |
| 1943042                      | 1943035                |                        |                        |                        |                        |                        |                        |                        |                        |                         |                         |                         |                         |                         |                         |
| 1943049                      | 1943006                |                        |                        |                        |                        |                        |                        |                        |                        |                         |                         |                         |                         |                         |                         |
| 1943055                      | 1943022                | 1943000                | 2044012                | 1943009                | 2043043                | 2043004                | 1943010                | 2043042                | 2043002                | 1944055                 | 1943024                 |                         |                         |                         |                         |
| 1944004                      | 1944007                | 2044052                | 1944027                | 2044024                | 2044021                |                        |                        |                        |                        |                         |                         |                         |                         |                         |                         |
| 1944007                      | 1944004                | 1944026                | 1944027                | 2044024                | 2044052                | 2044054                | 2044021                |                        |                        |                         |                         |                         |                         |                         |                         |
| 1944009                      | 1943009                |                        |                        |                        |                        |                        |                        |                        |                        |                         |                         |                         |                         |                         |                         |
| 1944026                      | 1944062                | 2044019                | 1944007                | 2044052                | 2044020                | 2044054                | 2044024                | 2044053                | 2044021                |                         |                         |                         |                         |                         |                         |
| 1944027                      | 2044024                | 2044052                | 1944007                | 1944004                | 2044019                | 2044021                | 2044012                |                        |                        |                         |                         |                         |                         |                         |                         |
| 1944055                      | 1944027                | 2044024                | 2044012                | 2044053                | 2044052                | 2044054                | 1943055                | 2043043                | 1944004                | 2044020                 | 2043002                 | 2043004                 | 2043042                 | 1943009                 |                         |
| 1944062                      | 2044043                | 1944026                | 2044019                | 2044020                | 2044052                | 2044054                | 2044021                | 2044024                |                        |                         |                         |                         |                         |                         |                         |
| 2043002                      | 2043042                | 2043043                | 2043004                | 2044012                | 2044008                | 1943055                | 1944055                | 1943010                |                        |                         |                         |                         |                         |                         |                         |
| 2043004                      | 2043042                | 2043043                | 2043002                | 2044012                | 1943055                | 1943010                |                        |                        |                        |                         |                         |                         |                         |                         |                         |
| 2043042                      | 2043004                | 2043002                | 2043043                | 2044012                | 1943055                | 1943010                | 1944055                |                        |                        |                         |                         |                         |                         |                         |                         |
| 2043043                      | 2043002                | 2043004                | 2043042                | 2044012                | 1943000                | 1943022                | 1943055                | 1944055                | 1943010                | 2044024                 | 2044053                 |                         |                         |                         |                         |

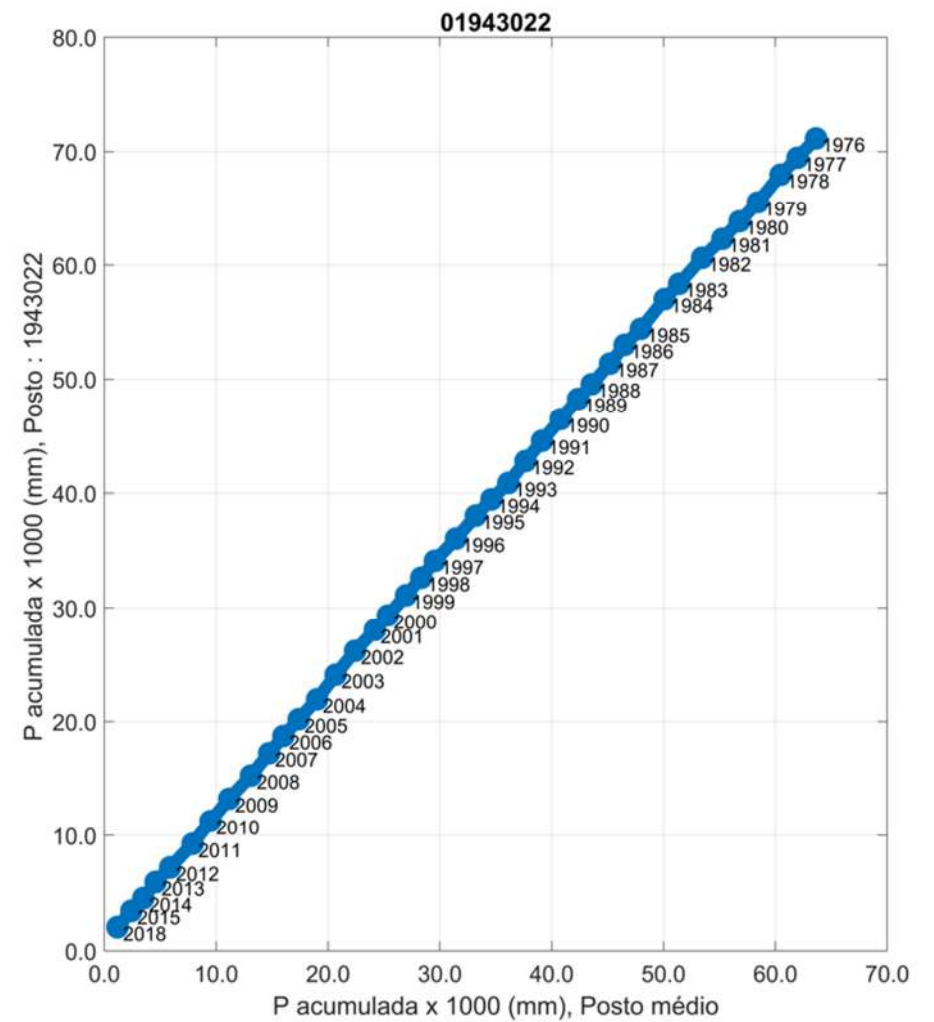
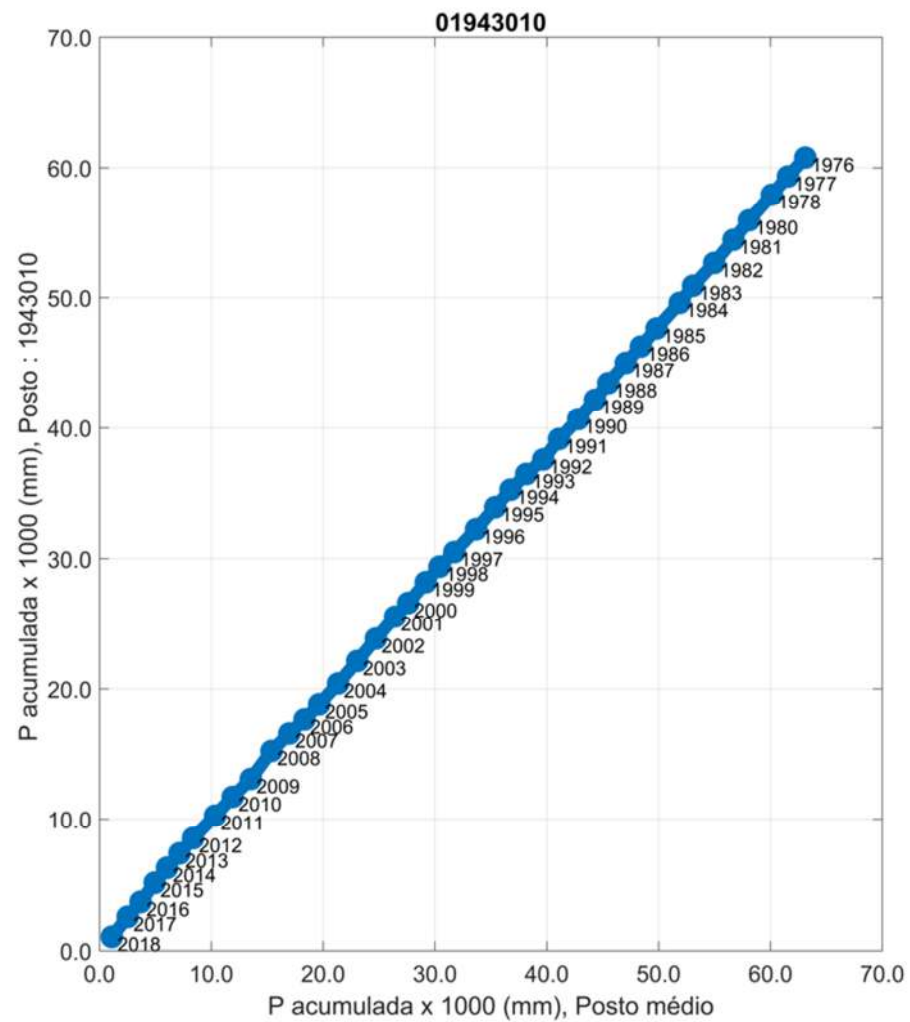
| <b>Estação<br/>Analisada</b> | <b>Est.<br/>Próx 1</b> | <b>Est.<br/>Próx 2</b> | <b>Est.<br/>Próx 3</b> | <b>Est.<br/>Próx 4</b> | <b>Est.<br/>Próx 5</b> | <b>Est.<br/>Próx 6</b> | <b>Est.<br/>Próx 7</b> | <b>Est.<br/>Próx 8</b> | <b>Est.<br/>Próx 9</b> | <b>Est.<br/>Próx 10</b> | <b>Est.<br/>Próx 11</b> | <b>Est.<br/>Próx 12</b> | <b>Est.<br/>Próx 13</b> | <b>Est.<br/>Próx 14</b> | <b>Est.<br/>Próx 15</b> |
|------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 2044008                      | 2044043                |                        |                        |                        |                        |                        |                        |                        |                        |                         |                         |                         |                         |                         |                         |
| 2044012                      | 2043043                | 1944055                | 1943022                | 2043002                | 2043004                | 1943055                | 2043042                | 1943000                | 2044024                | 2044053                 | 1944027                 | 2044021                 | 2044052                 | 1943009                 | 2044054                 |
| 2044016                      | 2044020                | 2044021                |                        |                        |                        |                        |                        |                        |                        |                         |                         |                         |                         |                         |                         |
| 2044019                      | 2044020                | 2044054                | 2044052                | 2044043                | 2044021                | 1944062                | 1944026                | 2044024                | 1944027                |                         |                         |                         |                         |                         |                         |
| 2044020                      | 2044019                | 2044054                | 2044043                | 1944062                | 2044052                | 1944026                | 2044024                | 2044008                |                        |                         |                         |                         |                         |                         |                         |
| 2044021                      | 2044054                | 2044052                | 2044053                | 2044019                | 2044024                | 1944026                | 1944062                | 1944027                | 1944004                | 1944007                 | 2044012                 |                         |                         |                         |                         |
| 2044024                      | 1944027                | 2044053                | 2044052                | 2044021                | 2044054                | 2044019                | 1944026                | 2044043                | 1944004                | 1944007                 | 1944062                 | 2044020                 | 2044012                 | 2043043                 |                         |
| 2044043                      | 1944062                | 2044019                | 2044052                | 2044020                | 2044054                | 2044024                | 2044008                |                        |                        |                         |                         |                         |                         |                         |                         |
| 2044052                      | 2044019                | 2044054                | 2044021                | 2044053                | 2044043                | 2044024                | 2044020                | 1944026                | 1944062                | 1944004                 | 1944027                 | 1944007                 | 2044012                 |                         |                         |
| 2044053                      | 2044024                | 2044021                | 2044052                | 2044054                | 1944026                | 1944055                | 2044012                |                        |                        |                         |                         |                         |                         |                         |                         |
| 2044054                      | 2044021                | 2044019                | 2044052                | 2044020                | 2044053                | 2044043                | 1944062                | 2044024                | 1944026                | 1944007                 | 2044012                 |                         |                         |                         |                         |

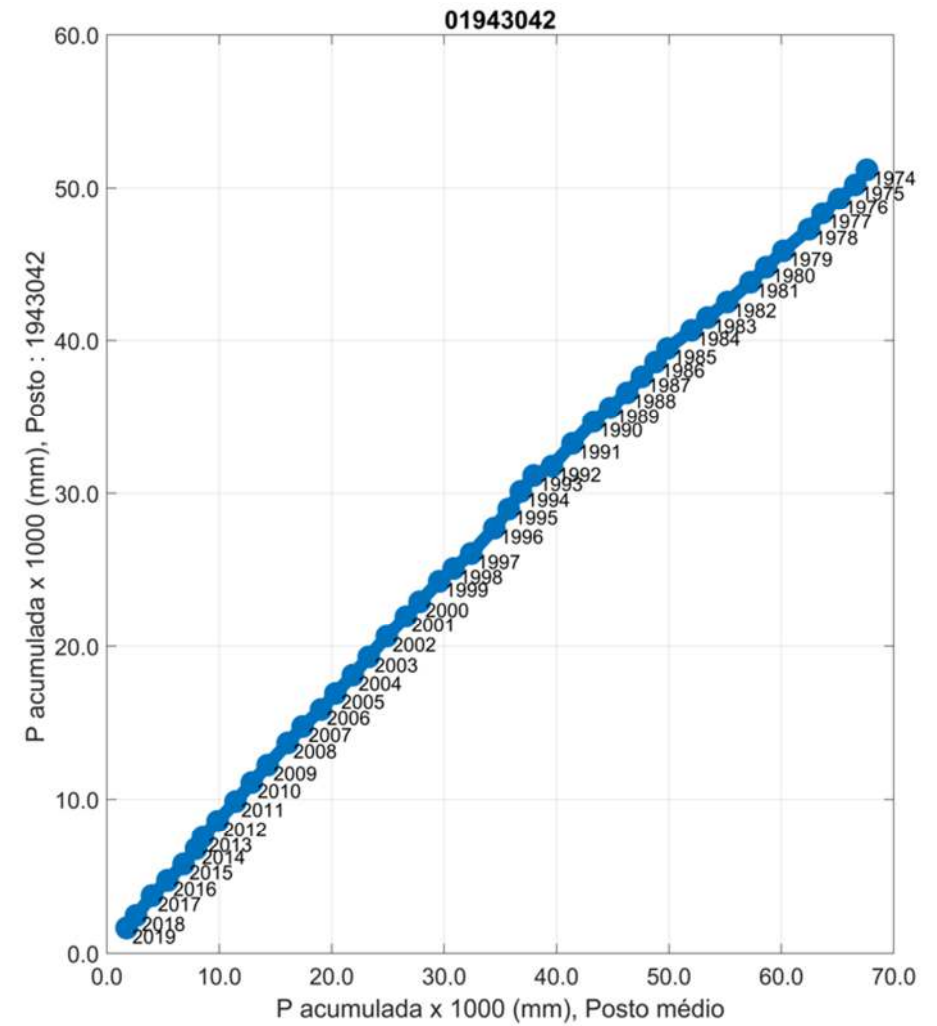
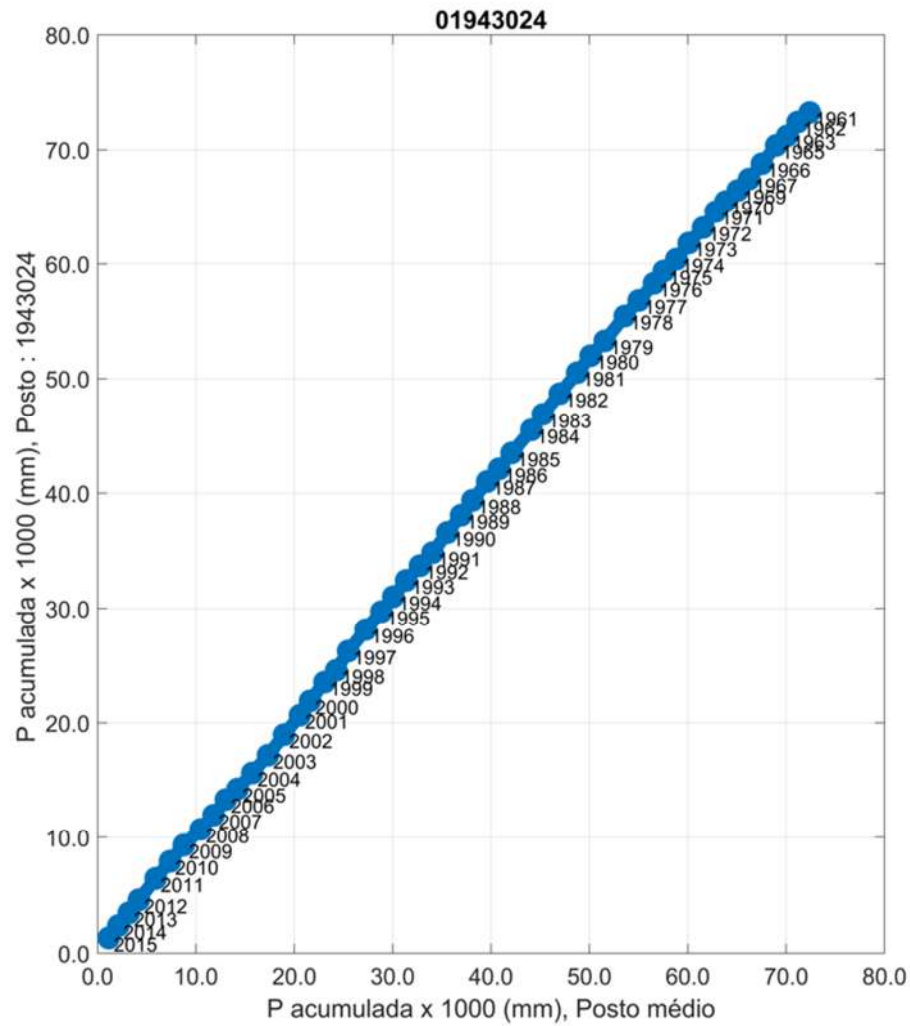
Est. Próx: Estação próxima empregada como apoio.

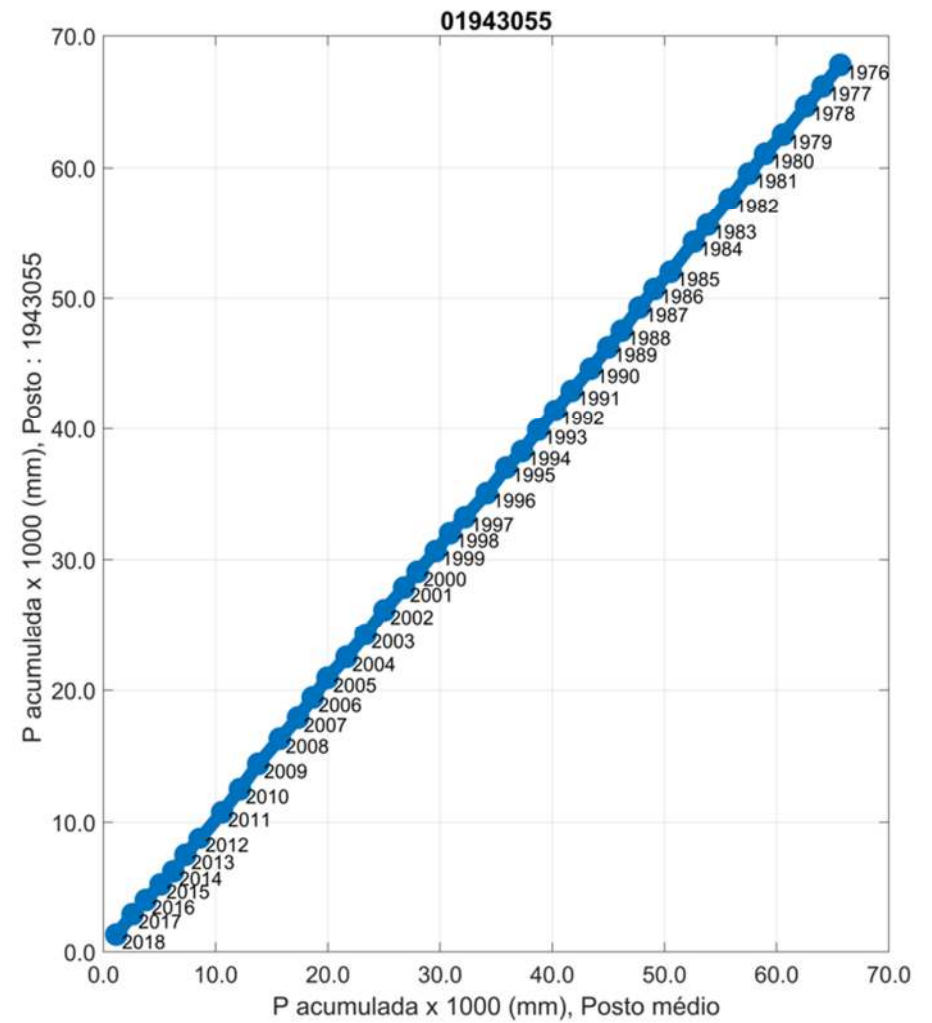
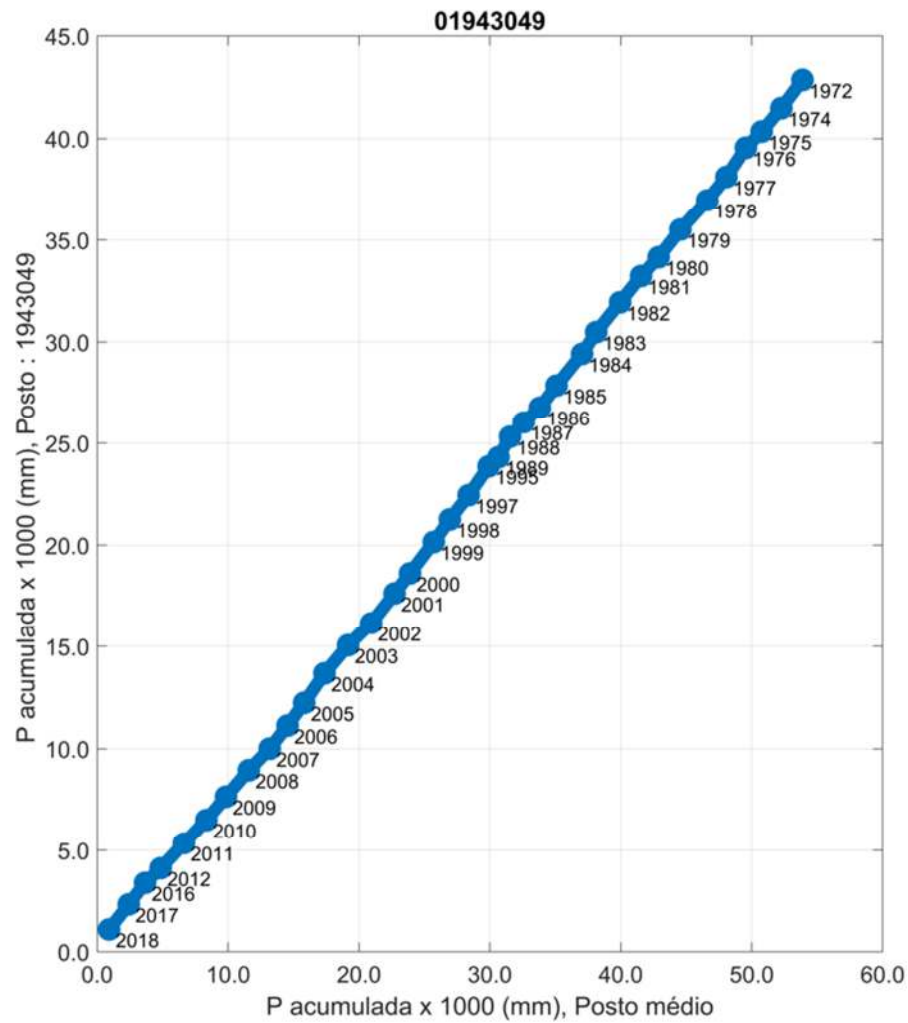
## APÊNDICE 2: CURVAS DE DUPLA MASSA

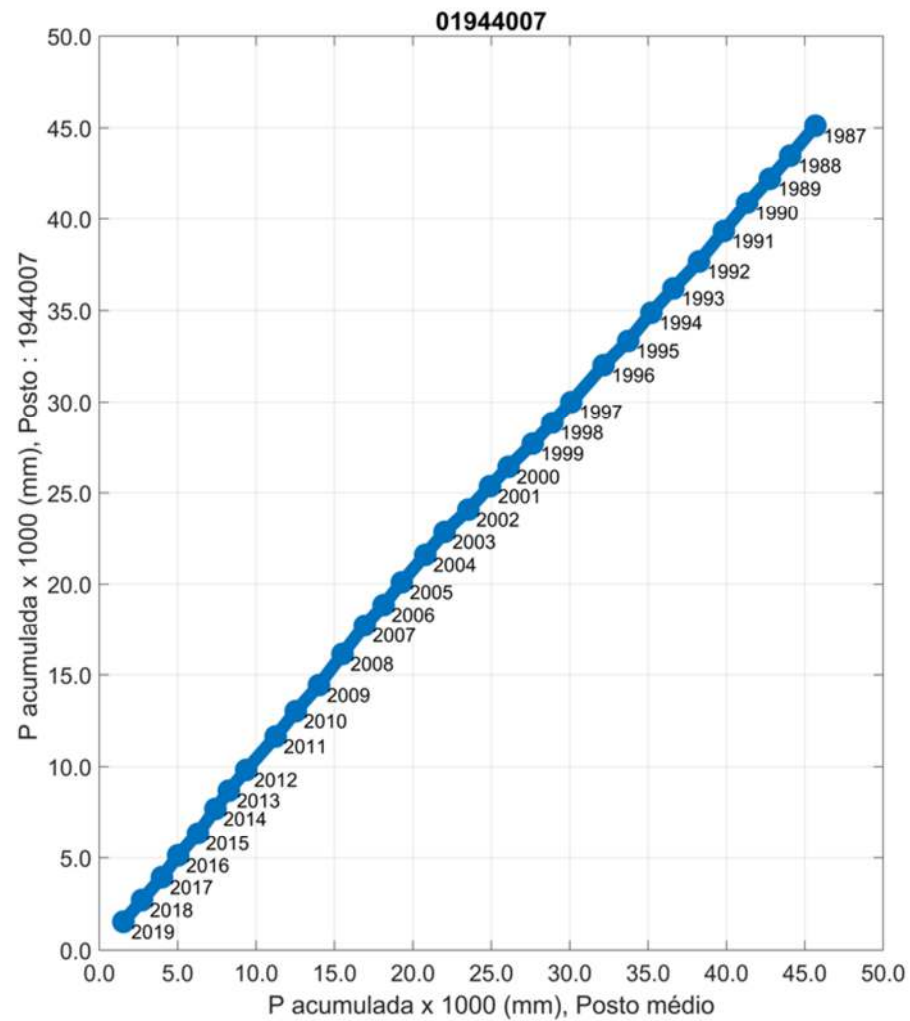
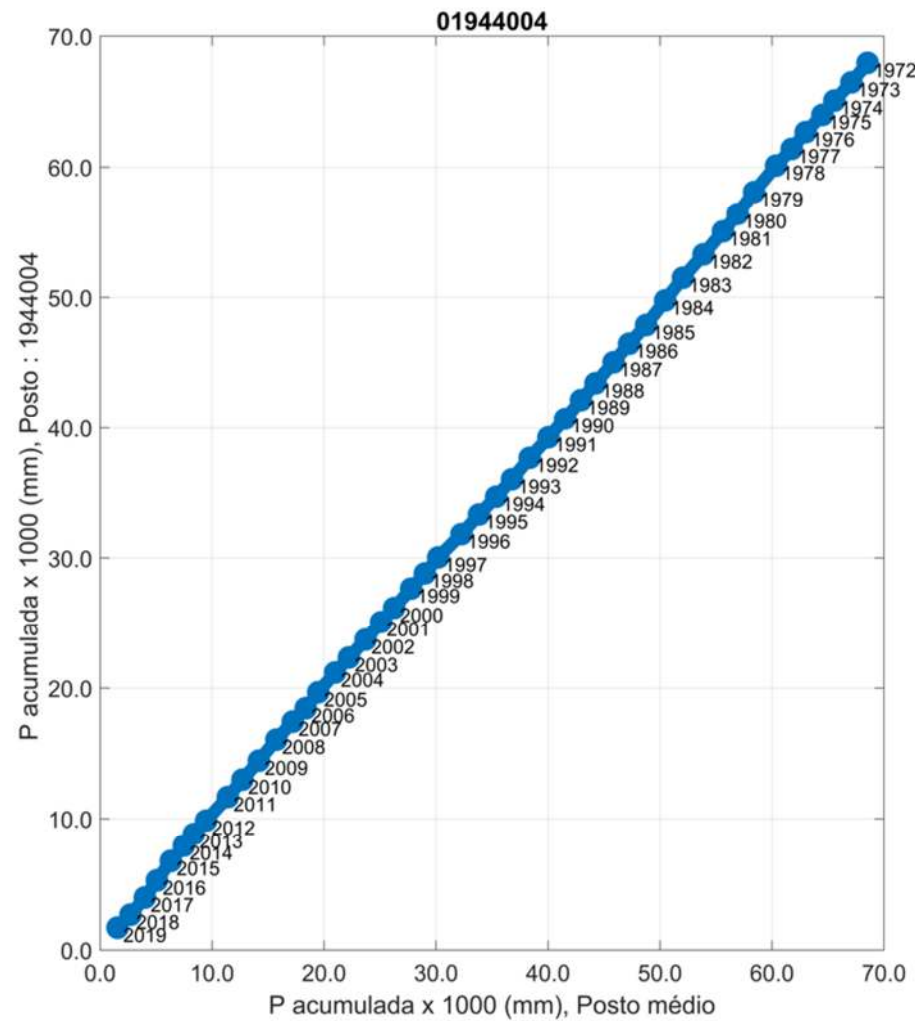


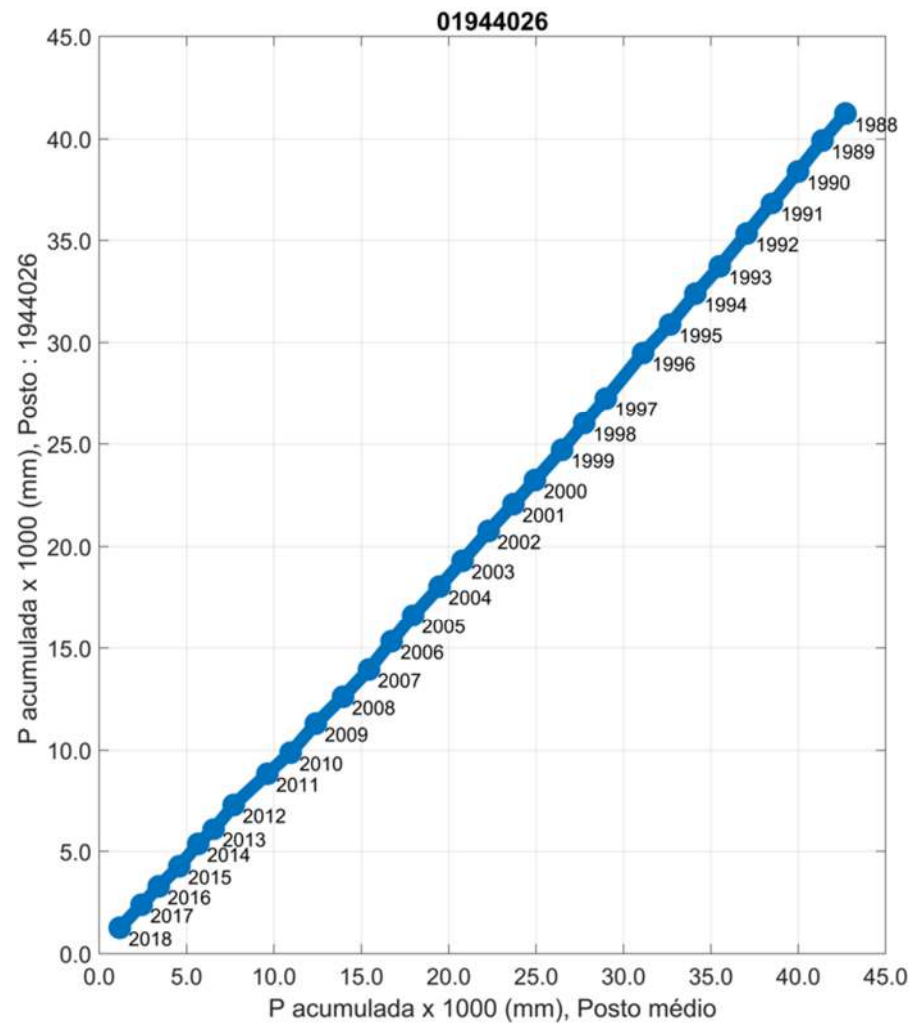
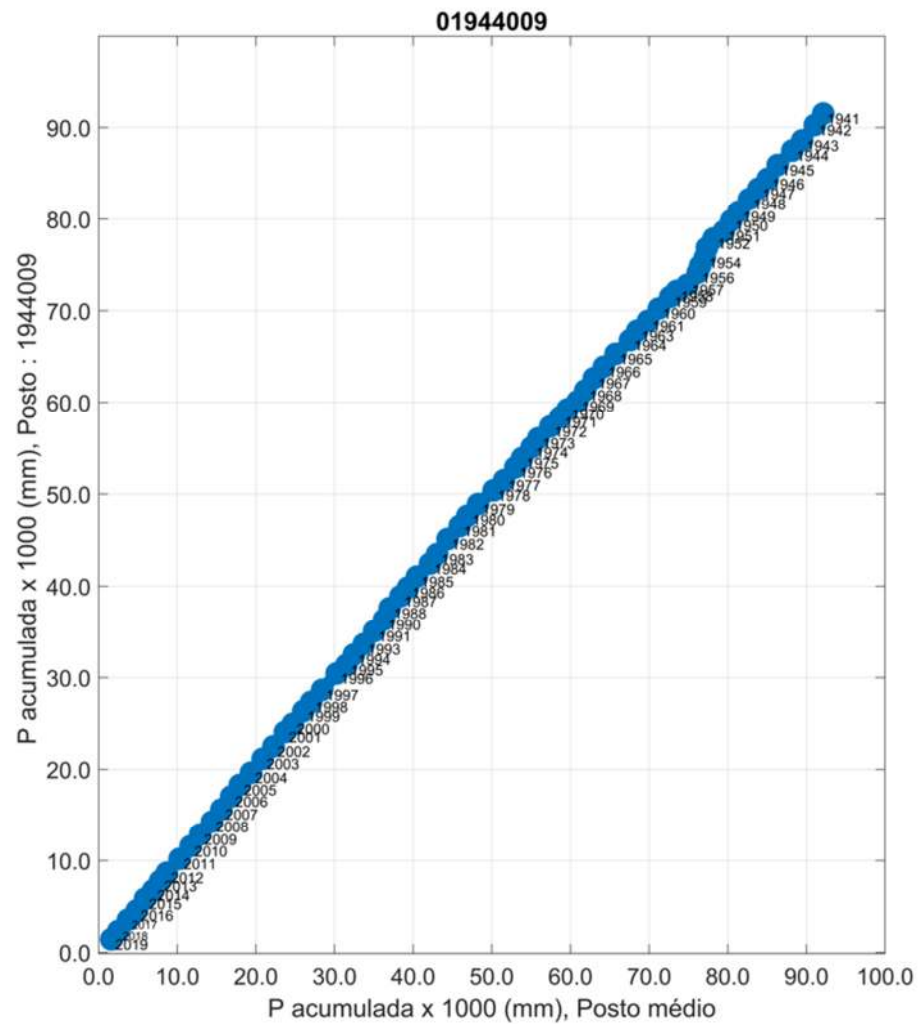


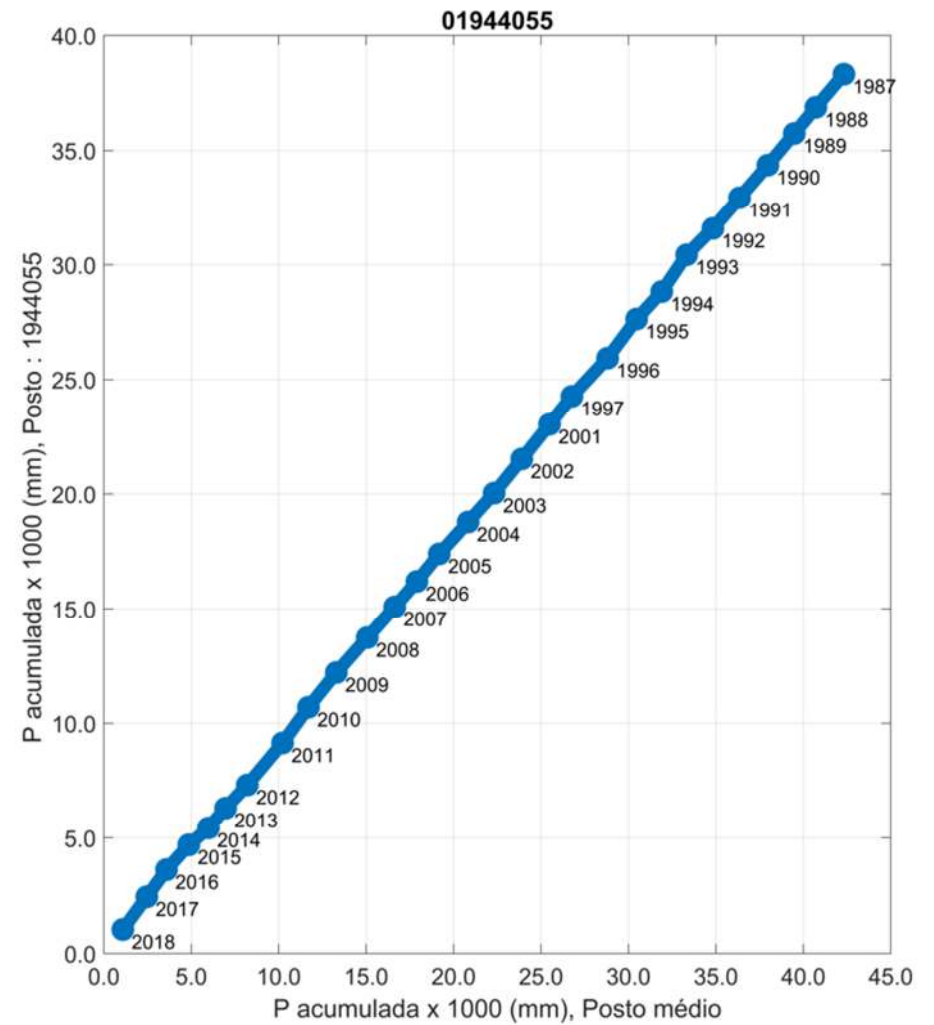
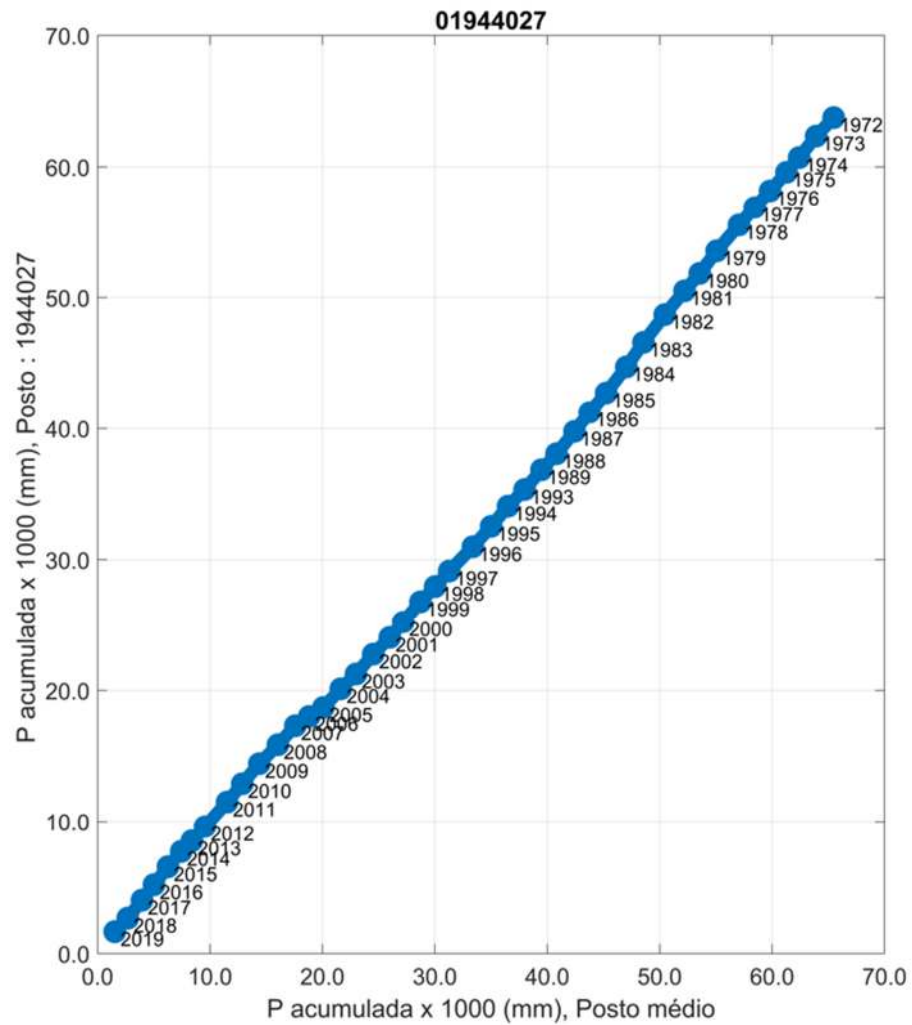


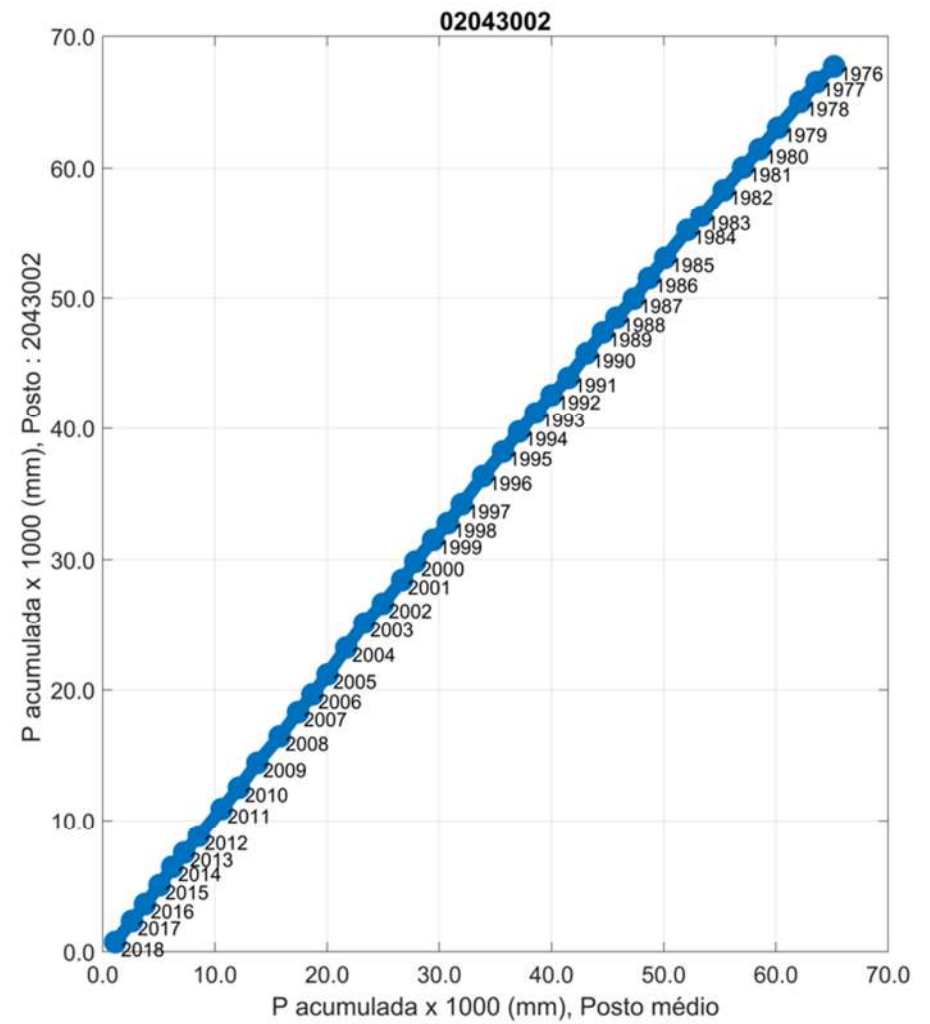
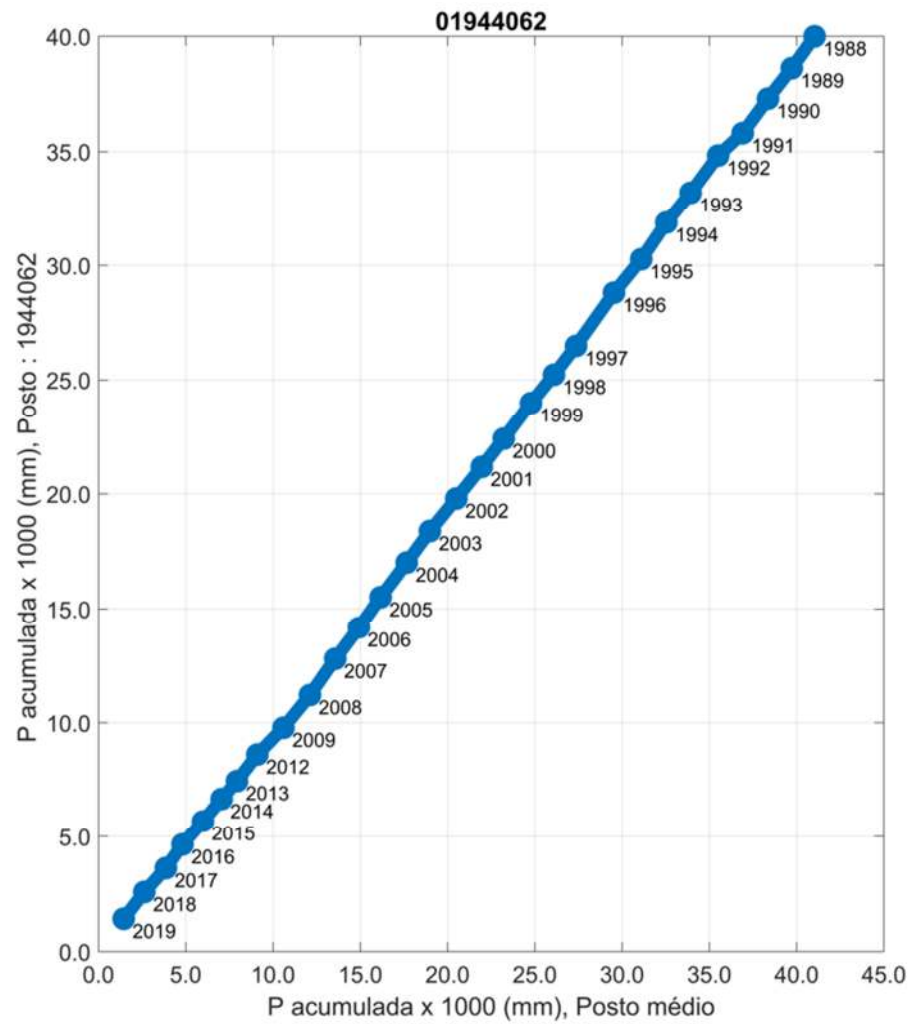


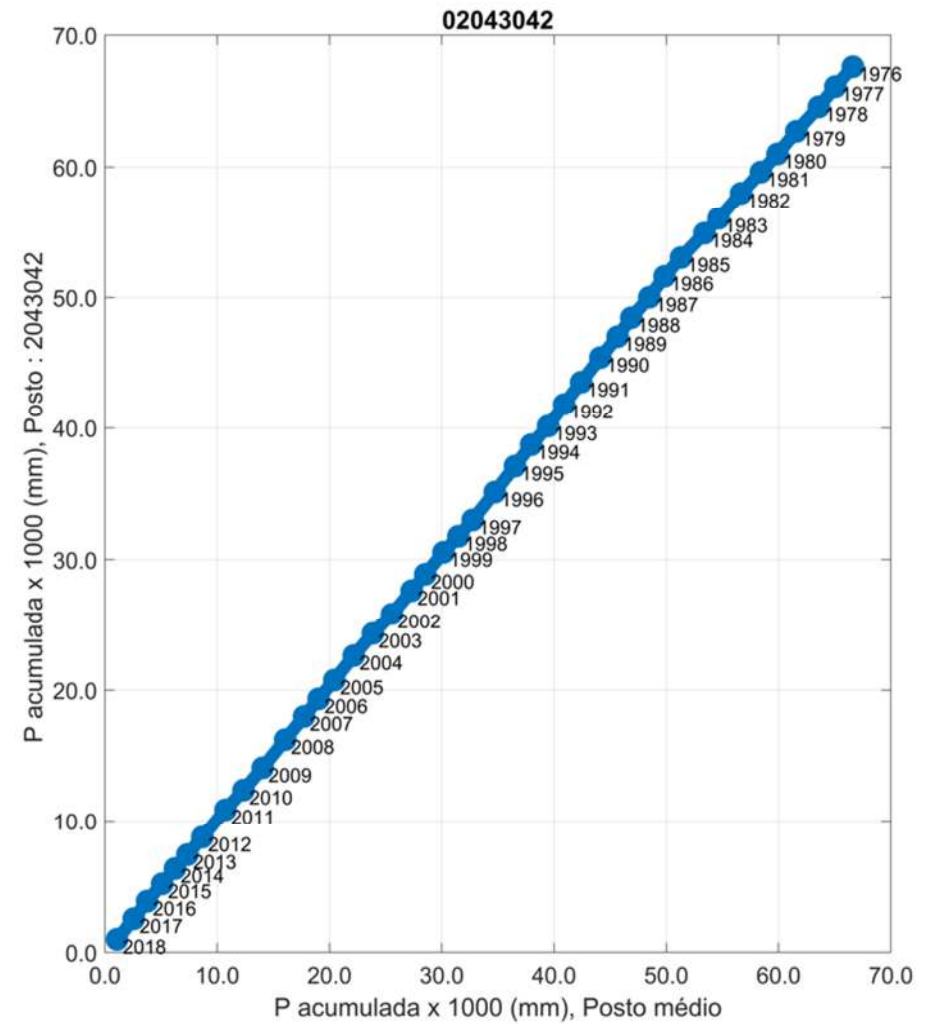
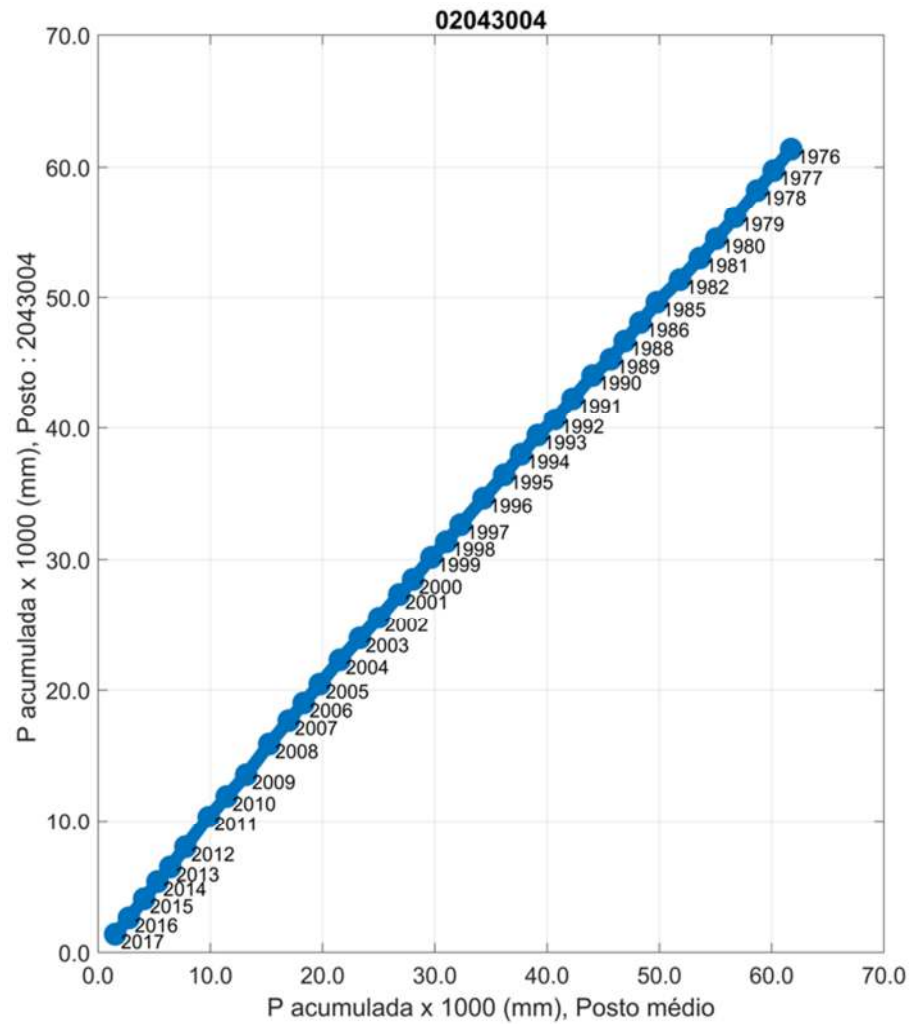


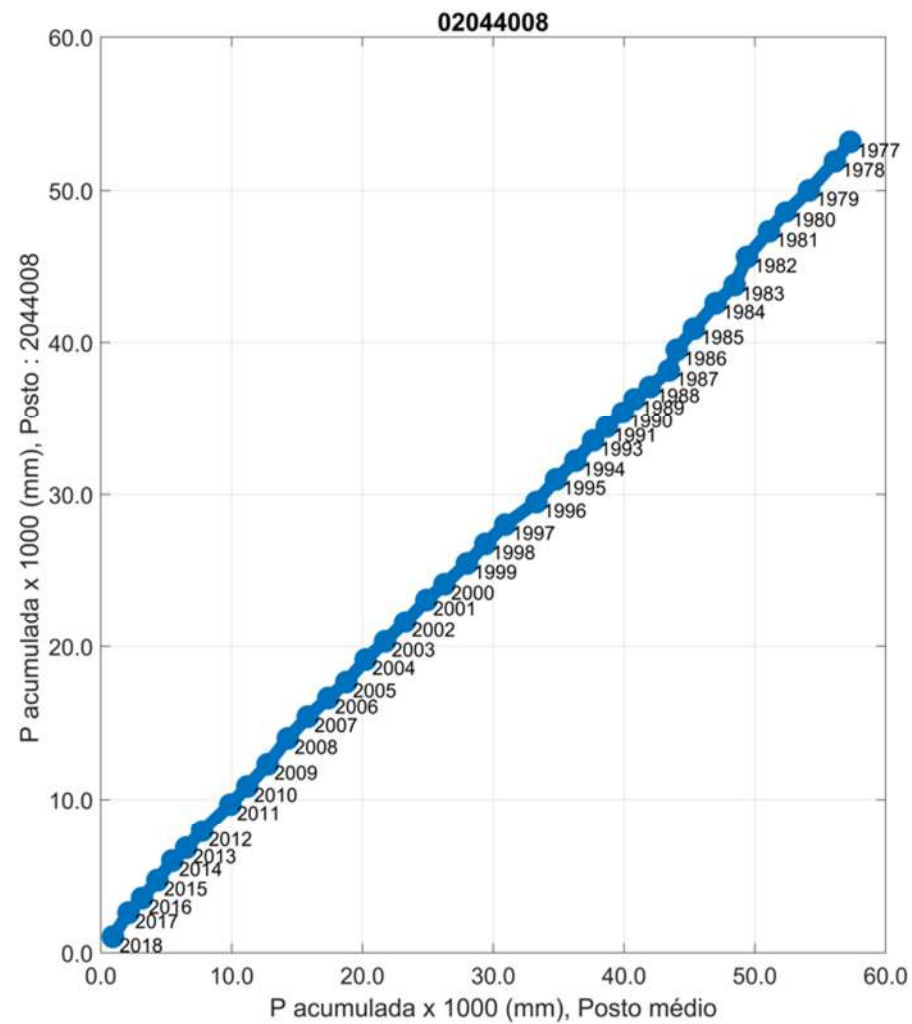
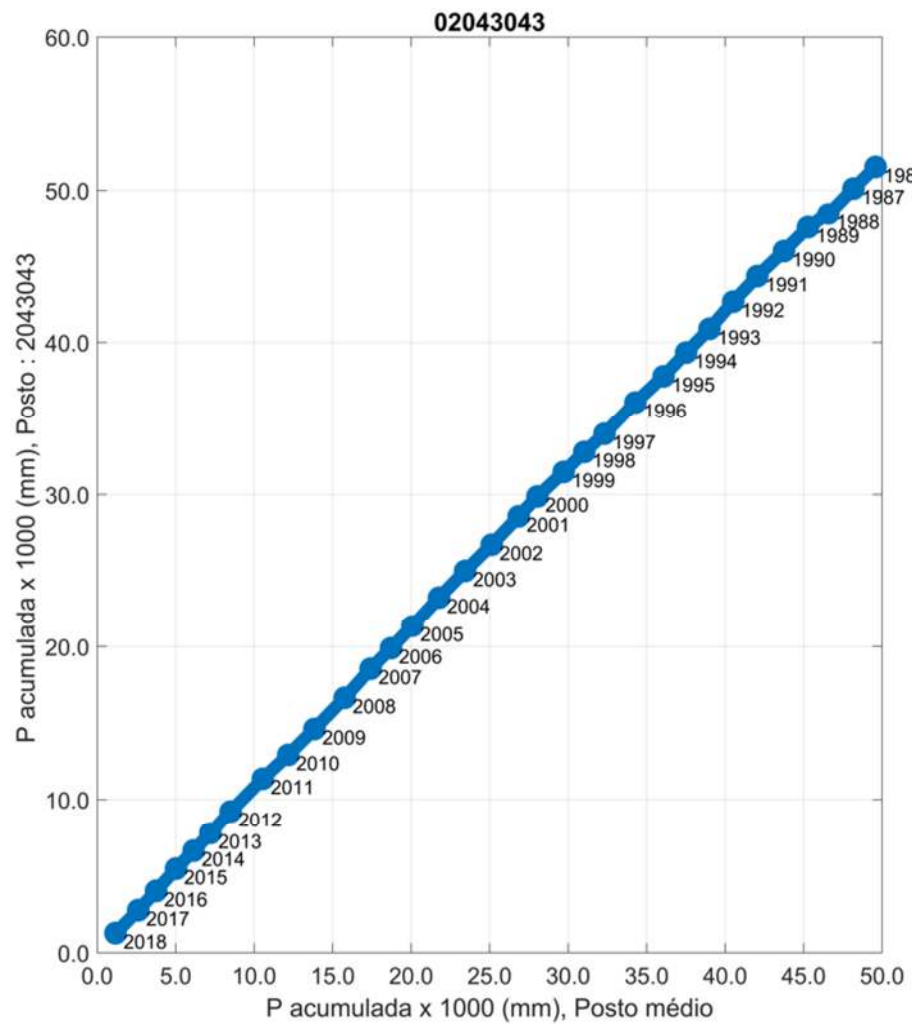


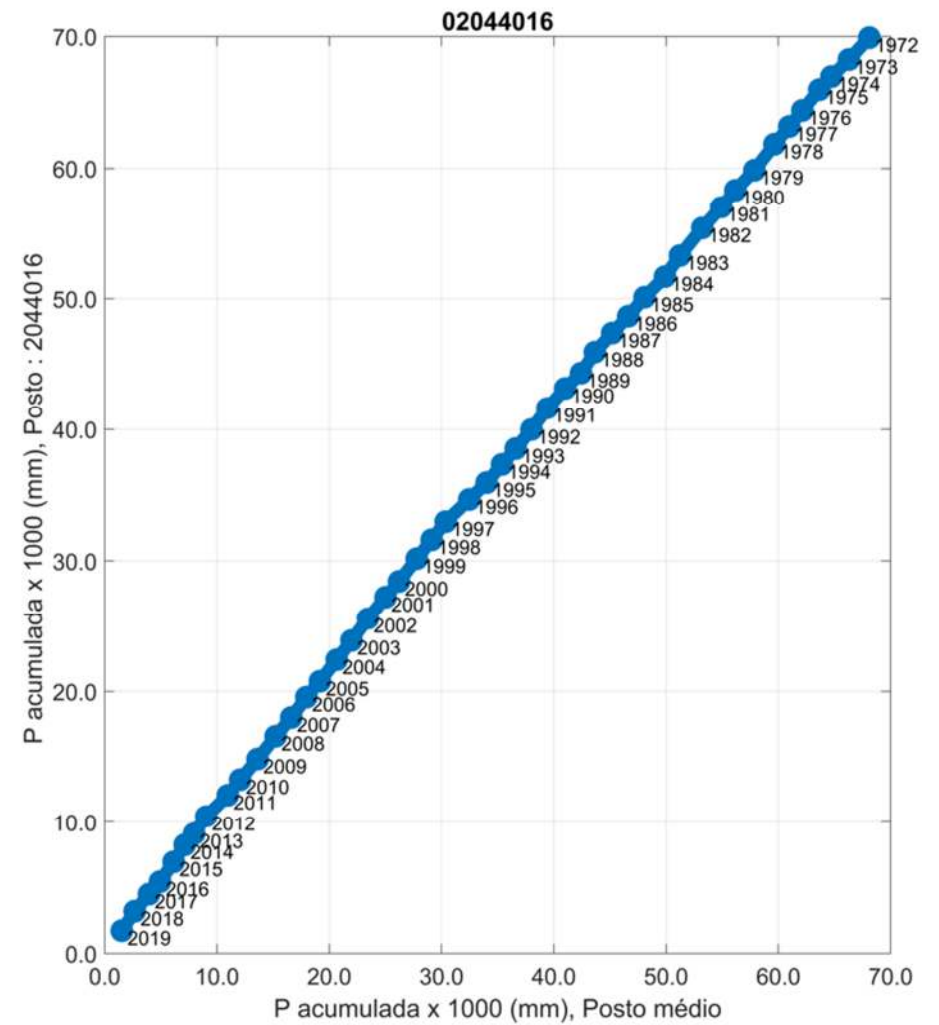
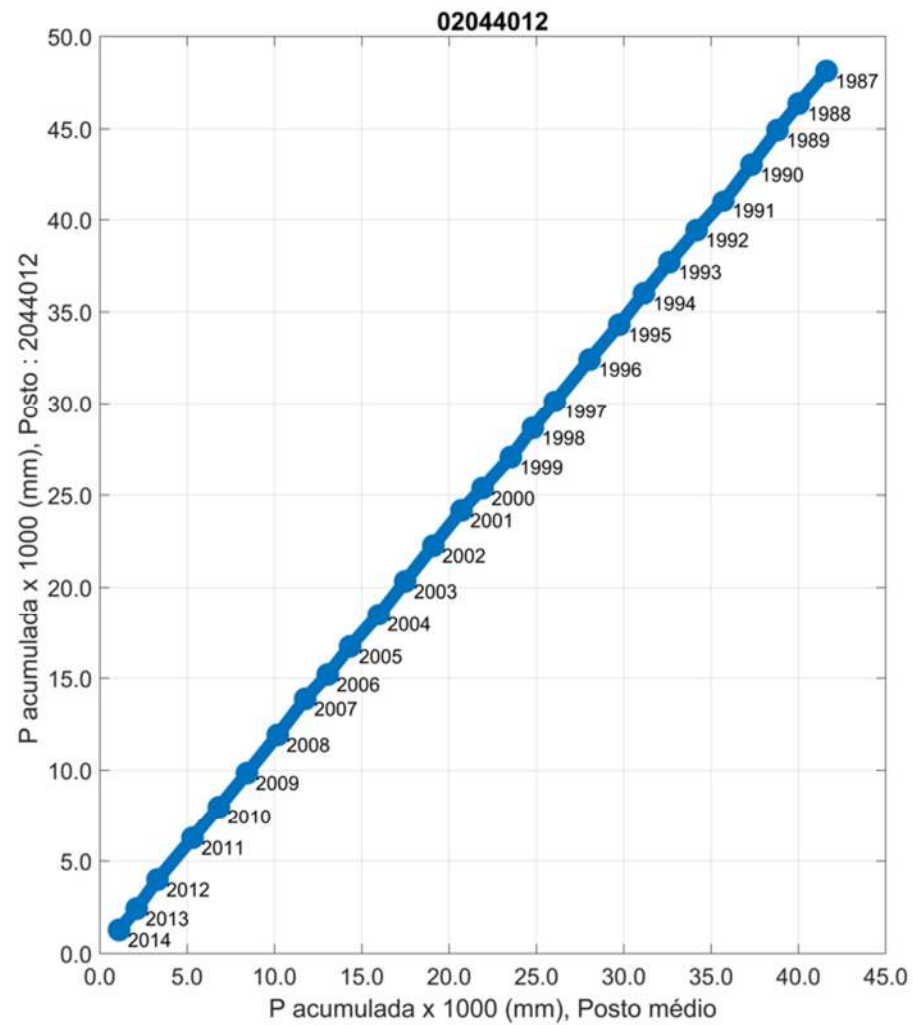


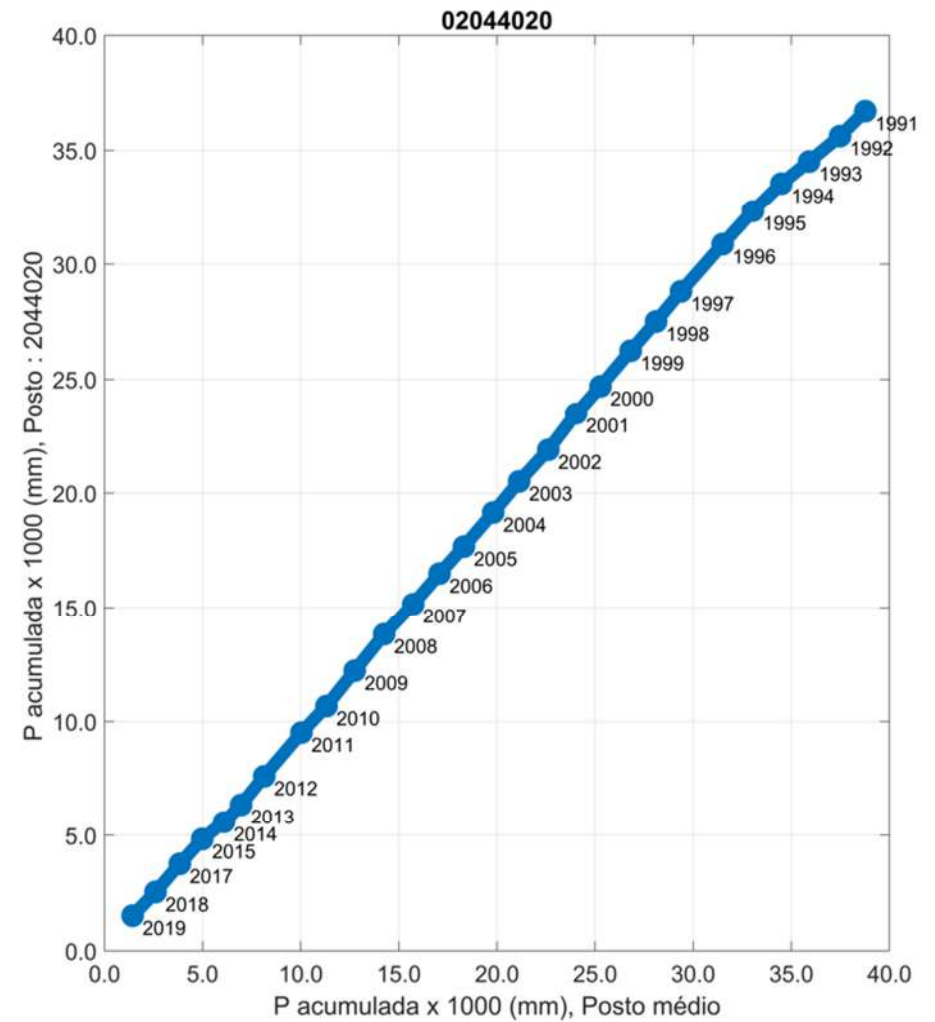
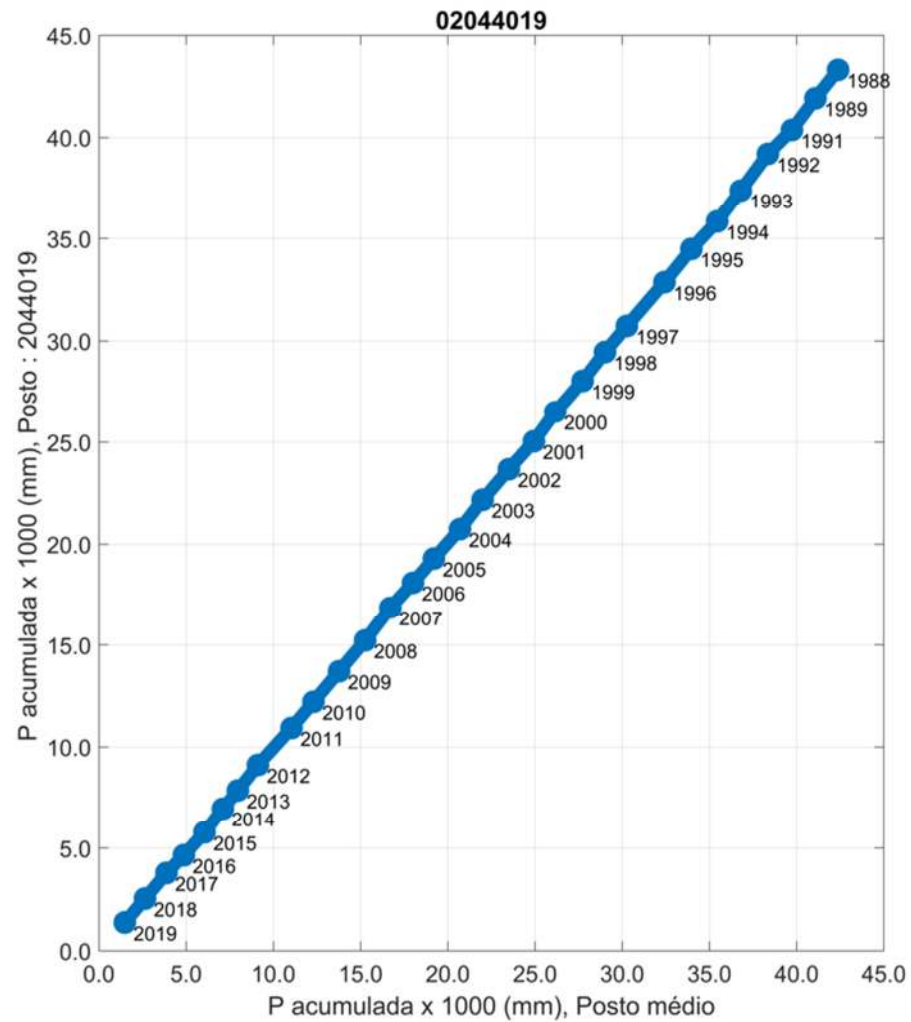


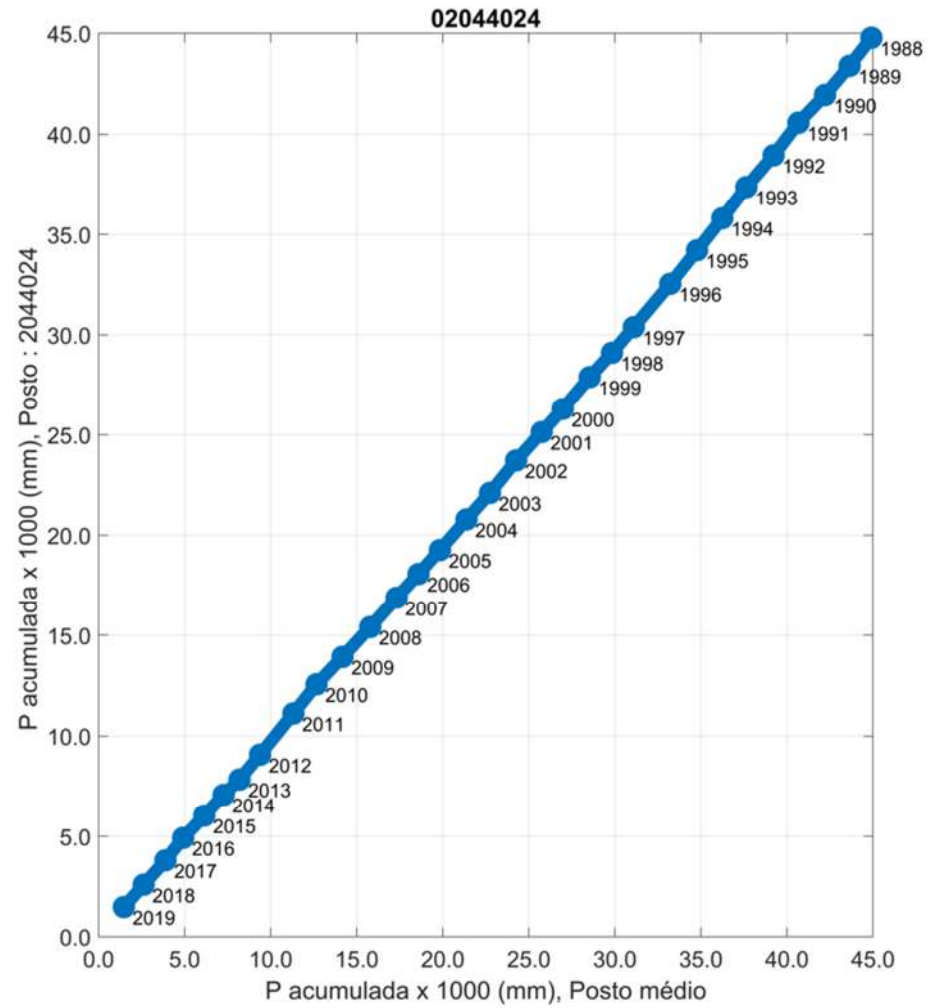
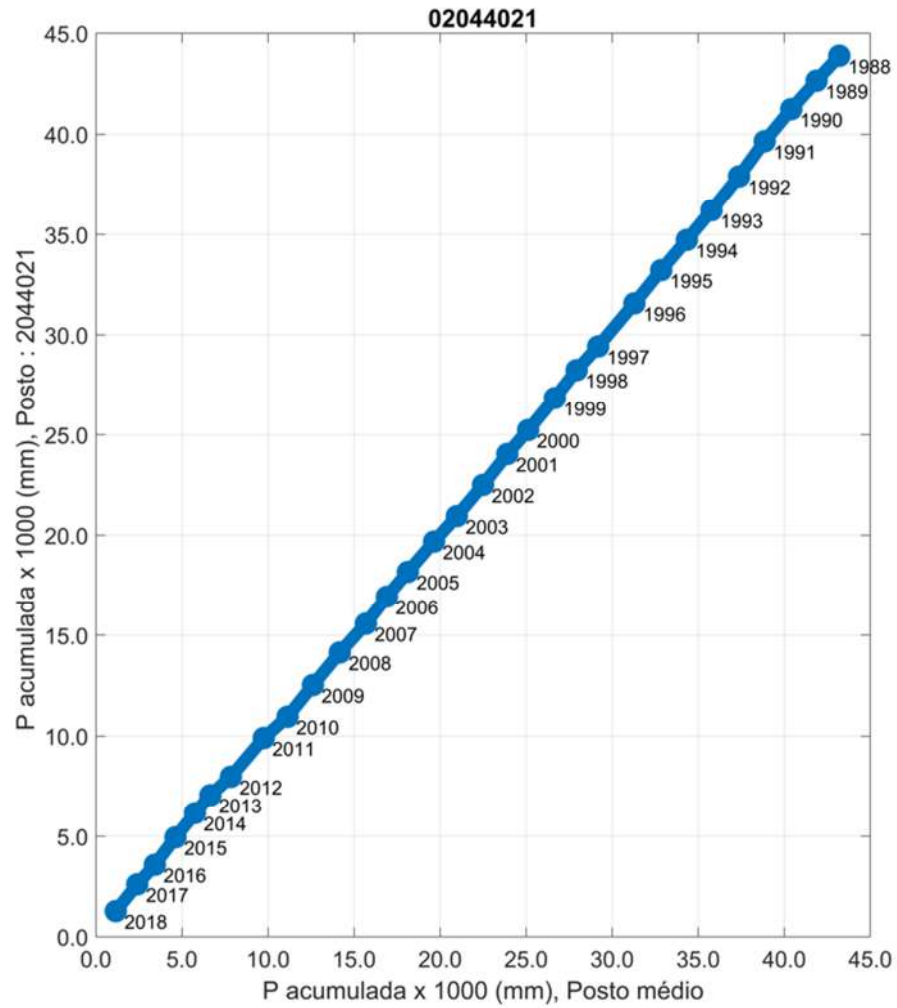


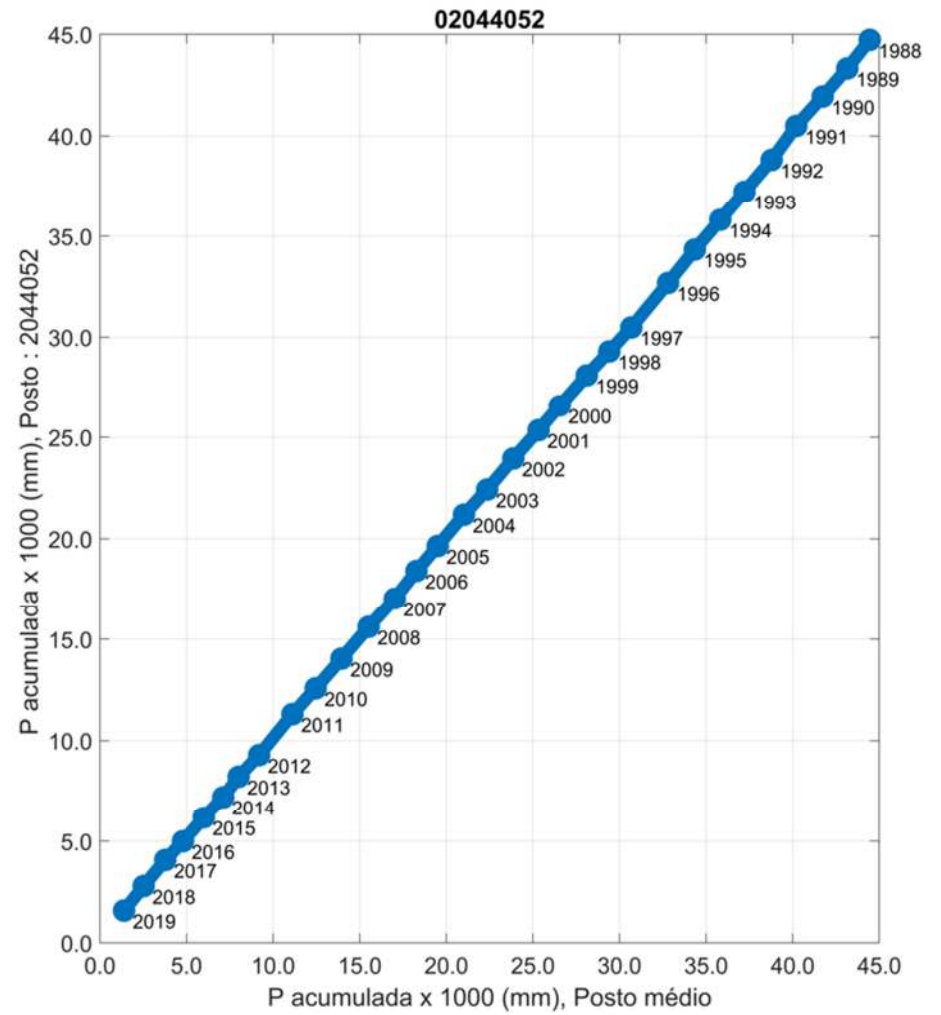
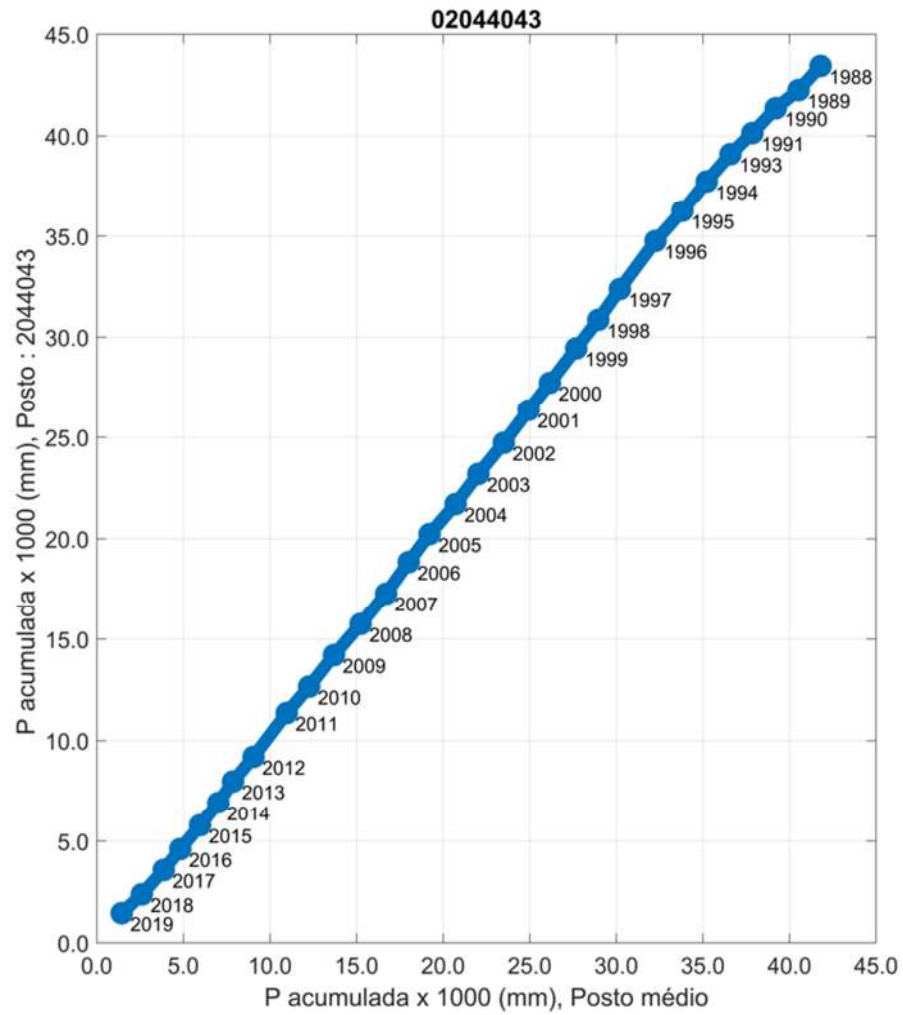


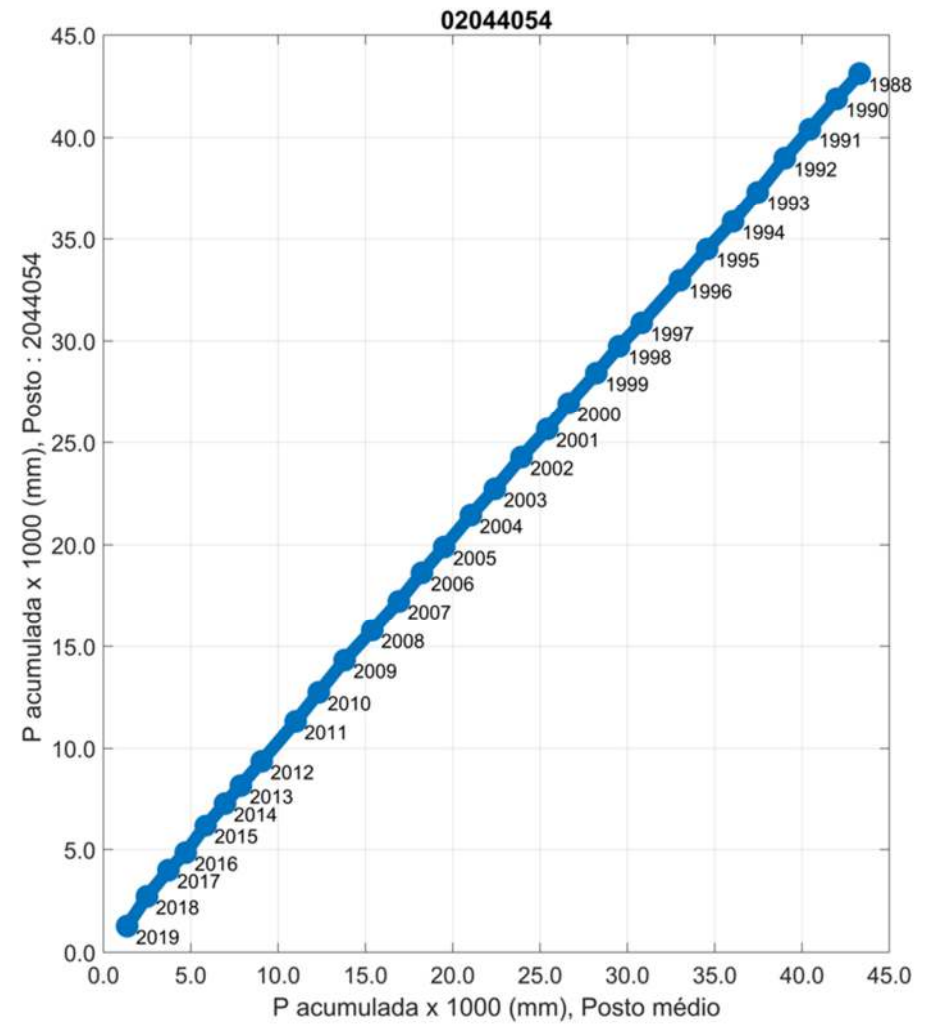
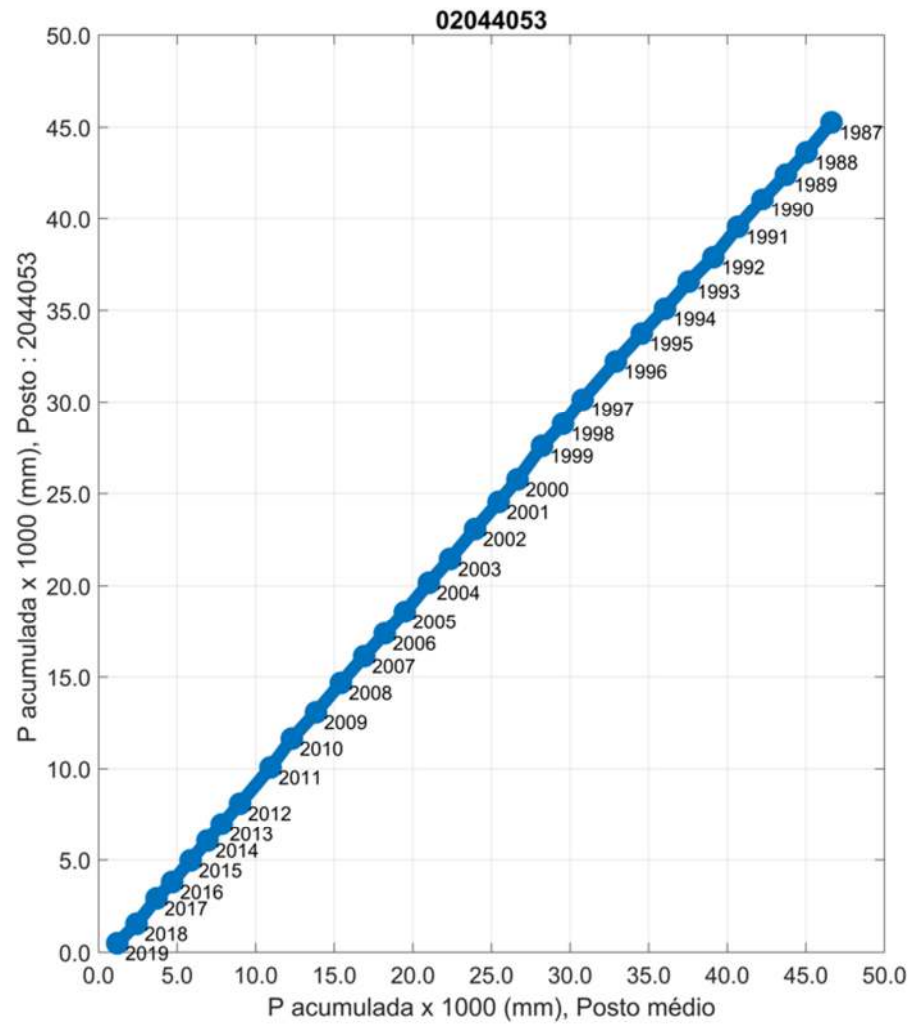












## APÊNDICE 3: SIMULAÇÕES EMPREGADAS EM CADA CENÁRIO DE EMISSÃO

### 3.1 Cenário de emissão SSP1-2.6

| ID | Modelo       | Ensemble   | Simulação             | Nome da simulação no presente trabalho |
|----|--------------|------------|-----------------------|--|
| 1  | CESM2        | r4i1flp1   | CESM2-r4i1f1p1        | CESM2-R4                               |
| 2  | CMCC-CM2-SR5 | r1i1flp1   | CMCC-CM2-SR5-r1i1f1p1 | CMCC-CM2-SR5-R1                        |
| 3  | CMCC-ESM2    | r1i1flp1   | CMCC-ESM2-r1i1f1p1    | CMCC-ESM2-R1                           |
| 4  | EC-Earth3    | r1i1flp1   | EC-Earth3-r1i1f1p1    | EC-Earth3-R1                           |
| 5  | EC-Earth3    | r101i1p1f1 | EC-Earth3-r101i1p1f1  | EC-Earth3-R101                         |
| 6  | EC-Earth3    | r102i1p1f1 | EC-Earth3-r102i1p1f1  | EC-Earth3-R102                         |
| 7  | EC-Earth3    | r103i1p1f1 | EC-Earth3-r103i1p1f1  | EC-Earth3-R103                         |
| 8  | EC-Earth3    | r104i1p1f1 | EC-Earth3-r104i1p1f1  | EC-Earth3-R104                         |
| 9  | EC-Earth3    | r105i1p1f1 | EC-Earth3-r105i1p1f1  | EC-Earth3-R105                         |
| 10 | EC-Earth3    | r106i1p1f1 | EC-Earth3-r106i1p1f1  | EC-Earth3-R106                         |
| 11 | EC-Earth3    | r107i1p1f1 | EC-Earth3-r107i1p1f1  | EC-Earth3-R107                         |
| 12 | EC-Earth3    | r108i1p1f1 | EC-Earth3-r108i1p1f1  | EC-Earth3-R108                         |
| 13 | EC-Earth3    | r109i1p1f1 | EC-Earth3-r109i1p1f1  | EC-Earth3-R109                         |
| 14 | EC-Earth3    | r11i1flp1  | EC-Earth3-r11i1f1p1   | EC-Earth3-R11                          |
| 15 | EC-Earth3    | r110i1p1f1 | EC-Earth3-r110i1p1f1  | EC-Earth3-R110                         |
| 16 | EC-Earth3    | r111i1p1f1 | EC-Earth3-r111i1p1f1  | EC-Earth3-R111                         |
| 17 | EC-Earth3    | r112i1p1f1 | EC-Earth3-r112i1p1f1  | EC-Earth3-R112                         |
| 18 | EC-Earth3    | r113i1p1f1 | EC-Earth3-r113i1p1f1  | EC-Earth3-R113                         |
| 19 | EC-Earth3    | r114i1p1f1 | EC-Earth3-r114i1p1f1  | EC-Earth3-R114                         |
| 20 | EC-Earth3    | r115i1p1f1 | EC-Earth3-r115i1p1f1  | EC-Earth3-R115                         |
| 21 | EC-Earth3    | r116i1p1f1 | EC-Earth3-r116i1p1f1  | EC-Earth3-R116                         |
| 22 | EC-Earth3    | r117i1p1f1 | EC-Earth3-r117i1p1f1  | EC-Earth3-R117                         |
| 23 | EC-Earth3    | r118i1p1f1 | EC-Earth3-r118i1p1f1  | EC-Earth3-R118                         |
| 24 | EC-Earth3    | r119i1p1f1 | EC-Earth3-r119i1p1f1  | EC-Earth3-R119                         |
| 25 | EC-Earth3    | r121i1p1f1 | EC-Earth3-r121i1p1f1  | EC-Earth3-R121                         |
| 26 | EC-Earth3    | r122i1p1f1 | EC-Earth3-r122i1p1f1  | EC-Earth3-R122                         |
| 27 | EC-Earth3    | r123i1p1f1 | EC-Earth3-r123i1p1f1  | EC-Earth3-R123                         |
| 28 | EC-Earth3    | r124i1p1f1 | EC-Earth3-r124i1p1f1  | EC-Earth3-R124                         |
| 29 | EC-Earth3    | r125i1p1f1 | EC-Earth3-r125i1p1f1  | EC-Earth3-R125                         |
| 30 | EC-Earth3    | r126i1p1f1 | EC-Earth3-r126i1p1f1  | EC-Earth3-R126                         |
| 31 | EC-Earth3    | r127i1p1f1 | EC-Earth3-r127i1p1f1  | EC-Earth3-R127                         |
| 32 | EC-Earth3    | r128i1p1f1 | EC-Earth3-r128i1p1f1  | EC-Earth3-R128                         |
| 33 | EC-Earth3    | r129i1p1f1 | EC-Earth3-r129i1p1f1  | EC-Earth3-R129                         |
| 34 | EC-Earth3    | r13i1flp1  | EC-Earth3-r13i1f1p1   | EC-Earth3-R13                          |
| 35 | EC-Earth3    | r130i1p1f1 | EC-Earth3-r130i1p1f1  | EC-Earth3-R130                         |
| 36 | EC-Earth3    | r131i1p1f1 | EC-Earth3-r131i1p1f1  | EC-Earth3-R131                         |
| 37 | EC-Earth3    | r132i1p1f1 | EC-Earth3-r132i1p1f1  | EC-Earth3-R132                         |
| 38 | EC-Earth3    | r133i1p1f1 | EC-Earth3-r133i1p1f1  | EC-Earth3-R133                         |

| <b>ID</b> | <b>Modelo</b> | <b>Ensemble</b> | <b>Simulação</b>       | <b>Nome da simulação no presente trabalho</b> |
|-----------|---------------|-----------------|------------------------|---|
| 39        | EC-Earth3     | r134i1p1fl      | EC-Earth3-r134i1p1f1   | EC-Earth3-R134                                |
| 40        | EC-Earth3     | r135i1p1fl      | EC-Earth3-r135i1p1f1   | EC-Earth3-R135                                |
| 41        | EC-Earth3     | r136i1p1fl      | EC-Earth3-r136i1p1f1   | EC-Earth3-R136                                |
| 42        | EC-Earth3     | r137i1p1fl      | EC-Earth3-r137i1p1f1   | EC-Earth3-R137                                |
| 43        | EC-Earth3     | r138i1p1fl      | EC-Earth3-r138i1p1f1   | EC-Earth3-R138                                |
| 44        | EC-Earth3     | r139i1p1fl      | EC-Earth3-r139i1p1f1   | EC-Earth3-R139                                |
| 45        | EC-Earth3     | r140i1p1fl      | EC-Earth3-r140i1p1f1   | EC-Earth3-R140                                |
| 46        | EC-Earth3     | r141i1p1fl      | EC-Earth3-r141i1p1f1   | EC-Earth3-R141                                |
| 47        | EC-Earth3     | r142i1p1fl      | EC-Earth3-r142i1p1f1   | EC-Earth3-R142                                |
| 48        | EC-Earth3     | r143i1p1fl      | EC-Earth3-r143i1p1f1   | EC-Earth3-R143                                |
| 49        | EC-Earth3     | r144i1p1fl      | EC-Earth3-r144i1p1f1   | EC-Earth3-R144                                |
| 50        | EC-Earth3     | r145i1p1fl      | EC-Earth3-r145i1p1f1   | EC-Earth3-R145                                |
| 51        | EC-Earth3     | r146i1p1fl      | EC-Earth3-r146i1p1f1   | EC-Earth3-R146                                |
| 52        | EC-Earth3     | r147i1p1fl      | EC-Earth3-r147i1p1f1   | EC-Earth3-R147                                |
| 53        | EC-Earth3     | r148i1p1fl      | EC-Earth3-r148i1p1f1   | EC-Earth3-R148                                |
| 54        | EC-Earth3     | r149i1p1fl      | EC-Earth3-r149i1p1f1   | EC-Earth3-R149                                |
| 55        | EC-Earth3     | r15i1p1fl       | EC-Earth3-r15i1p1f1    | EC-Earth3-R15                                 |
| 56        | EC-Earth3     | r150i1p1fl      | EC-Earth3-r150i1p1f1   | EC-Earth3-R150                                |
| 57        | EC-Earth3     | r4i1flp1        | EC-Earth3-r4i1f1p1     | EC-Earth3-R4                                  |
| 58        | EC-Earth3     | r6i1flp1        | EC-Earth3-r6i1f1p1     | EC-Earth3-R6                                  |
| 59        | EC-Earth3-Veg | r1i1flp1        | EC-Earth3-Veg-r1i1f1p1 | EC-Earth3-Veg-R1                              |
| 60        | EC-Earth3-Veg | r3i1flp1        | EC-Earth3-Veg-r3i1f1p1 | EC-Earth3-Veg-R3                              |
| 61        | EC-Earth3-Veg | r4i1flp1        | EC-Earth3-Veg-r4i1f1p1 | EC-Earth3-Veg-R4                              |
| 62        | EC-Earth3-Veg | r6i1flp1        | EC-Earth3-Veg-r6i1f1p1 | EC-Earth3-Veg-R6                              |
| 63        | GFDL-ESM4     | r1i1flp1        | GFDL-ESM4-r1i1f1p1     | GFDL-ESM4-R1                                  |
| 64        | INM-CM4-8     | r1i1flp1        | INM-CM4-8-r1i1f1p1     | INM-CM4-8-R1                                  |
| 65        | INM-CM5-0     | r1i1flp1        | INM-CM5-0-r1i1f1p1     | INM-CM5-0-R1                                  |
| 66        | MPI-ESM1-2-HR | r1i1flp1        | MPI-ESM1-2-HR-r1i1f1p1 | MPI-ESM1-2-HR-R1                              |
| 67        | MPI-ESM1-2-HR | r2i1flp1        | MPI-ESM1-2-HR-r2i1f1p1 | MPI-ESM1-2-HR-R2                              |
| 68        | MRI-ESM2-0    | r1i1flp1        | MRI-ESM2-0-r1i1f1p1    | MRI-ESM2-0-R1                                 |
| 69        | NorESM2-MM    | r1i1flp1        | NorESM2-MM-r1i1f1p1    | NorESM2-MM-R1                                 |
| 70        | TaiESM1       | r1i1flp1        | TaiESM1-r1i1f1p1       | TaiESM1-R1                                    |

### 3.2 Cenário de emissão SSP5-8.5

| ID | Modelo       | Ensemble   | Simulação             | Nome da simulação no presente trabalho |
|----|--------------|------------|-----------------------|--|
| 1  | CESM2        | r11ilflpl  | CESM2-r11ilflpl       | CESM2-R11                              |
| 2  | CESM2-WACCM  | r1ilflpl   | CESM2-WACCM-r1ilflpl  | CESM2-WACCM-R1                         |
| 3  | CESM2-WACCM  | r3ilflpl   | CESM2-WACCM-r3ilflpl  | CESM2-WACCM-R3                         |
| 4  | CMCC-CM2-SR5 | r1ilflpl   | CMCC-CM2-SR5-r1ilflpl | CMCC-CM2-SR5-R1                        |
| 5  | CMCC-ESM2    | r1ilflpl   | CMCC-ESM2-r1ilflpl    | CMCC-ESM2-R1                           |
| 6  | EC-Earth3-CC | r1ilflpl   | EC-Earth3-CC-r1ilflpl | EC-Earth3-CC-R1                        |
| 7  | EC-Earth3    | r1ilflpl   | EC-Earth3-r1ilflpl    | EC-Earth3-R1                           |
| 8  | EC-Earth3    | r101ilp1fl | EC-Earth3-r101ilp1fl  | EC-Earth3-R101                         |
| 9  | EC-Earth3    | r102ilp1fl | EC-Earth3-r102ilp1fl  | EC-Earth3-R102                         |
| 10 | EC-Earth3    | r103ilp1fl | EC-Earth3-r103ilp1fl  | EC-Earth3-R103                         |
| 11 | EC-Earth3    | r104ilp1fl | EC-Earth3-r104ilp1fl  | EC-Earth3-R104                         |
| 12 | EC-Earth3    | r105ilp1fl | EC-Earth3-r105ilp1fl  | EC-Earth3-R105                         |
| 13 | EC-Earth3    | r106ilp1fl | EC-Earth3-r106ilp1fl  | EC-Earth3-R106                         |
| 14 | EC-Earth3    | r107ilp1fl | EC-Earth3-r107ilp1fl  | EC-Earth3-R107                         |
| 15 | EC-Earth3    | r108ilp1fl | EC-Earth3-r108ilp1fl  | EC-Earth3-R108                         |
| 16 | EC-Earth3    | r109ilp1fl | EC-Earth3-r109ilp1fl  | EC-Earth3-R109                         |
| 17 | EC-Earth3    | r11ilflpl  | EC-Earth3-r11ilflpl   | EC-Earth3-R11                          |
| 18 | EC-Earth3    | r110ilp1fl | EC-Earth3-r110ilp1fl  | EC-Earth3-R110                         |
| 19 | EC-Earth3    | r111ilp1fl | EC-Earth3-r111ilp1fl  | EC-Earth3-R111                         |
| 20 | EC-Earth3    | r112ilp1fl | EC-Earth3-r112ilp1fl  | EC-Earth3-R112                         |
| 21 | EC-Earth3    | r113ilp1fl | EC-Earth3-r113ilp1fl  | EC-Earth3-R113                         |
| 22 | EC-Earth3    | r114ilp1fl | EC-Earth3-r114ilp1fl  | EC-Earth3-R114                         |
| 23 | EC-Earth3    | r115ilp1fl | EC-Earth3-r115ilp1fl  | EC-Earth3-R115                         |
| 24 | EC-Earth3    | r116ilp1fl | EC-Earth3-r116ilp1fl  | EC-Earth3-R116                         |
| 25 | EC-Earth3    | r117ilp1fl | EC-Earth3-r117ilp1fl  | EC-Earth3-R117                         |
| 26 | EC-Earth3    | r118ilp1fl | EC-Earth3-r118ilp1fl  | EC-Earth3-R118                         |
| 27 | EC-Earth3    | r119ilp1fl | EC-Earth3-r119ilp1fl  | EC-Earth3-R119                         |
| 28 | EC-Earth3    | r121ilp1fl | EC-Earth3-r121ilp1fl  | EC-Earth3-R121                         |
| 29 | EC-Earth3    | r122ilp1fl | EC-Earth3-r122ilp1fl  | EC-Earth3-R122                         |
| 30 | EC-Earth3    | r123ilp1fl | EC-Earth3-r123ilp1fl  | EC-Earth3-R123                         |
| 31 | EC-Earth3    | r124ilp1fl | EC-Earth3-r124ilp1fl  | EC-Earth3-R124                         |
| 32 | EC-Earth3    | r125ilp1fl | EC-Earth3-r125ilp1fl  | EC-Earth3-R125                         |
| 33 | EC-Earth3    | r126ilp1fl | EC-Earth3-r126ilp1fl  | EC-Earth3-R126                         |
| 34 | EC-Earth3    | r127ilp1fl | EC-Earth3-r127ilp1fl  | EC-Earth3-R127                         |
| 35 | EC-Earth3    | r128ilp1fl | EC-Earth3-r128ilp1fl  | EC-Earth3-R128                         |
| 36 | EC-Earth3    | r129ilp1fl | EC-Earth3-r129ilp1fl  | EC-Earth3-R129                         |
| 37 | EC-Earth3    | r131ilp1fl | EC-Earth3-r131ilp1fl  | EC-Earth3-R13                          |
| 38 | EC-Earth3    | r130ilp1fl | EC-Earth3-r130ilp1fl  | EC-Earth3-R130                         |
| 39 | EC-Earth3    | r131ilp1fl | EC-Earth3-r131ilp1fl  | EC-Earth3-R131                         |
| 40 | EC-Earth3    | r132ilp1fl | EC-Earth3-r132ilp1fl  | EC-Earth3-R132                         |
| 41 | EC-Earth3    | r133ilp1fl | EC-Earth3-r133ilp1fl  | EC-Earth3-R133                         |

| <b>ID</b> | <b>Modelo</b> | <b>Ensemble</b> | <b>Simulação</b>       | <b>Nome da simulação no presente trabalho</b> |
|-----------|---------------|-----------------|------------------------|---|
| 42        | EC-Earth3     | r134ilp1fl      | EC-Earth3-r134ilp1fl   | EC-Earth3-R134                                |
| 43        | EC-Earth3     | r135ilp1fl      | EC-Earth3-r135ilp1fl   | EC-Earth3-R135                                |
| 44        | EC-Earth3     | r136ilp1fl      | EC-Earth3-r136ilp1fl   | EC-Earth3-R136                                |
| 45        | EC-Earth3     | r137ilp1fl      | EC-Earth3-r137ilp1fl   | EC-Earth3-R137                                |
| 46        | EC-Earth3     | r138ilp1fl      | EC-Earth3-r138ilp1fl   | EC-Earth3-R138                                |
| 47        | EC-Earth3     | r139ilp1fl      | EC-Earth3-r139ilp1fl   | EC-Earth3-R139                                |
| 48        | EC-Earth3     | r140ilp1fl      | EC-Earth3-r140ilp1fl   | EC-Earth3-R140                                |
| 49        | EC-Earth3     | r141ilp1fl      | EC-Earth3-r141ilp1fl   | EC-Earth3-R141                                |
| 50        | EC-Earth3     | r142ilp1fl      | EC-Earth3-r142ilp1fl   | EC-Earth3-R142                                |
| 51        | EC-Earth3     | r143ilp1fl      | EC-Earth3-r143ilp1fl   | EC-Earth3-R143                                |
| 52        | EC-Earth3     | r144ilp1fl      | EC-Earth3-r144ilp1fl   | EC-Earth3-R144                                |
| 53        | EC-Earth3     | r145ilp1fl      | EC-Earth3-r145ilp1fl   | EC-Earth3-R145                                |
| 54        | EC-Earth3     | r146ilp1fl      | EC-Earth3-r146ilp1fl   | EC-Earth3-R146                                |
| 55        | EC-Earth3     | r147ilp1fl      | EC-Earth3-r147ilp1fl   | EC-Earth3-R147                                |
| 56        | EC-Earth3     | r148ilp1fl      | EC-Earth3-r148ilp1fl   | EC-Earth3-R148                                |
| 57        | EC-Earth3     | r149ilp1fl      | EC-Earth3-r149ilp1fl   | EC-Earth3-R149                                |
| 58        | EC-Earth3     | r15ilp1fl       | EC-Earth3-r15ilp1fl    | EC-Earth3-R15                                 |
| 59        | EC-Earth3     | r150ilp1fl      | EC-Earth3-r150ilp1fl   | EC-Earth3-R150                                |
| 60        | EC-Earth3     | r3ilflp1        | EC-Earth3-r3ilflp1     | EC-Earth3-R3                                  |
| 61        | EC-Earth3     | r4ilflp1        | EC-Earth3-r4ilflp1     | EC-Earth3-R4                                  |
| 62        | EC-Earth3     | r6ilflp1        | EC-Earth3-r6ilflp1     | EC-Earth3-R6                                  |
| 63        | EC-Earth3-Veg | r1ilflp1        | EC-Earth3-Veg-r1ilflp1 | EC-Earth3-Veg-R1                              |
| 64        | EC-Earth3-Veg | r2ilflp1        | EC-Earth3-Veg-r2ilflp1 | EC-Earth3-Veg-R2                              |
| 65        | EC-Earth3-Veg | r3ilflp1        | EC-Earth3-Veg-r3ilflp1 | EC-Earth3-Veg-R3                              |
| 66        | EC-Earth3-Veg | r4ilflp1        | EC-Earth3-Veg-r4ilflp1 | EC-Earth3-Veg-R4                              |
| 67        | EC-Earth3-Veg | r6ilflp1        | EC-Earth3-Veg-r6ilflp1 | EC-Earth3-Veg-R6                              |
| 68        | GFDL-CM4      | r1ilflp1        | GFDL-CM4-r1ilflp1      | GFDL-CM4-R1                                   |
| 69        | GFDL-ESM4     | r1ilflp1        | GFDL-ESM4-r1ilflp1     | GFDL-ESM4-R1                                  |
| 70        | INM-CM4-8     | r1ilflp1        | INM-CM4-8-r1ilflp1     | INM-CM4-8-R1                                  |
| 71        | INM-CM5-0     | r1ilflp1        | INM-CM5-0-r1ilflp1     | INM-CM5-0-R1                                  |
| 72        | MPI-ESM1-2-HR | r1ilflp1        | MPI-ESM1-2-HR-r1ilflp1 | MPI-ESM1-2-HR-R1                              |
| 73        | MPI-ESM1-2-HR | r2ilflp1        | MPI-ESM1-2-HR-r2ilflp1 | MPI-ESM1-2-HR-R2                              |
| 74        | MRI-ESM2-0    | r1ilflp1        | MRI-ESM2-0-r1ilflp1    | MRI-ESM2-0-R1                                 |
| 75        | NorESM2-MM    | r1ilflp1        | NorESM2-MM-r1ilflp1    | NorESM2-MM-R1                                 |
| 76        | TaiESM1       | r1ilflp1        | TaiESM1-r1ilflp1       | TaiESM1-R1                                    |

## APÊNDICE 4: AVALIAÇÃO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS EXTREMAS

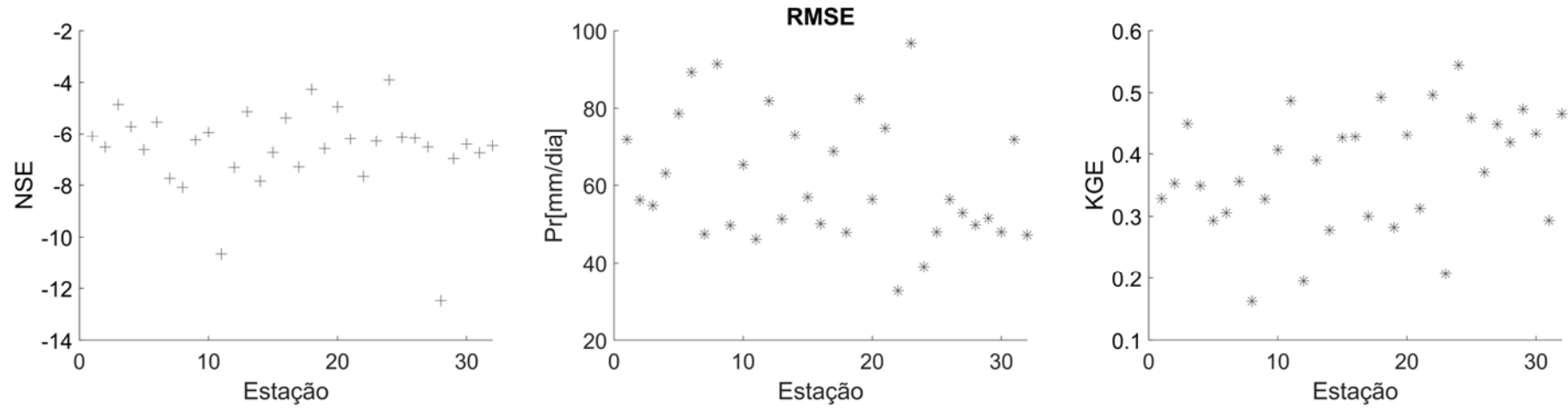
| SSP1-2.6       |         |       |         |       |                 |
|----------------|---------|-------|---------|-------|-----------------|
| SIMULAÇÃO      | ÍNDICES |       |         | NOTAS |                 |
| Cenário FS     | CDD     | CSDI  | CDD     | CSDI  | MÉDIA DAS NOTAS |
| EC-Earth3-R109 | 1,1%    | 15,8% | 1       | 4     | 2,5             |
| EC-Earth3-R121 | 26,6%   | -1,9% | 5       | 1     | 3               |
| EC-Earth3-R122 | 25,6%   | 16,0% | 4       | 5     | 4,5             |
| EC-Earth3-R4   | 16,7%   | 0,4%  | 3       | 2     | 2,5             |
| INM-CM5-0-R1   | 7,8%    | 5,6%  | 2       | 3     | 2,5             |
| Cenário QS     | CDD     | WSDI  | CDD     | WSDI  |                 |
| EC-Earth3-R110 | 25,6%   | -0,9% | 2       | 1     | 1,5             |
| EC-Earth3-R114 | 29,7%   | 9,0%  | 5       | 4     | 4,5             |
| EC-Earth3-R141 | 26,7%   | 22,2% | 4       | 5     | 4,5             |
| EC-Earth3-R143 | 23,3%   | 3,7%  | 1       | 2     | 1,5             |
| EC-Earth3-R148 | 26,6%   | 5,2%  | 3       | 3     | 3               |
| Cenário QU     | R99PTOT | WSDI  | R99PTOT | WSDI  |                 |
| CMCC-ESM2-R1   | 13,3%   | 8,2%  | 5       | 3     | 4               |
| EC-Earth3-R11  | 9,3%    | 10,6% | 4       | 4     | 4               |
| EC-Earth3-R124 | 4,7%    | 5,1%  | 2       | 2     | 2               |
| EC-Earth3-R139 | 7,3%    | 13,8% | 3       | 5     | 4 <sup>1</sup>  |
| EC-Earth3-R144 | -2,9%   | 4,4%  | 1       | 1     | 1               |
| Cenário FU     | R99PTOT | CSDI  | R99PTOT | CSDI  |                 |
| EC-Earth3-R102 | 8,5%    | 7,9%  | 3       | 5     | 4               |
| EC-Earth3-R116 | 0,7%    | -4,6% | 1       | 3     | 2               |
| EC-Earth3-R126 | 11,0%   | 1,5%  | 4       | 4     | 4               |
| EC-Earth3-R138 | 6,8%    | -8,7% | 2       | 1     | 1,5             |
| EC-Earth3-R140 | 14,6%   | -5,8% | 5       | 2     | 3,5             |

(1) Esta simulação não foi considerada porque as alterações das precipitações extremas foram maiores nas simulações CMCC-ESM2-R1 e EC-Earth3-R11.

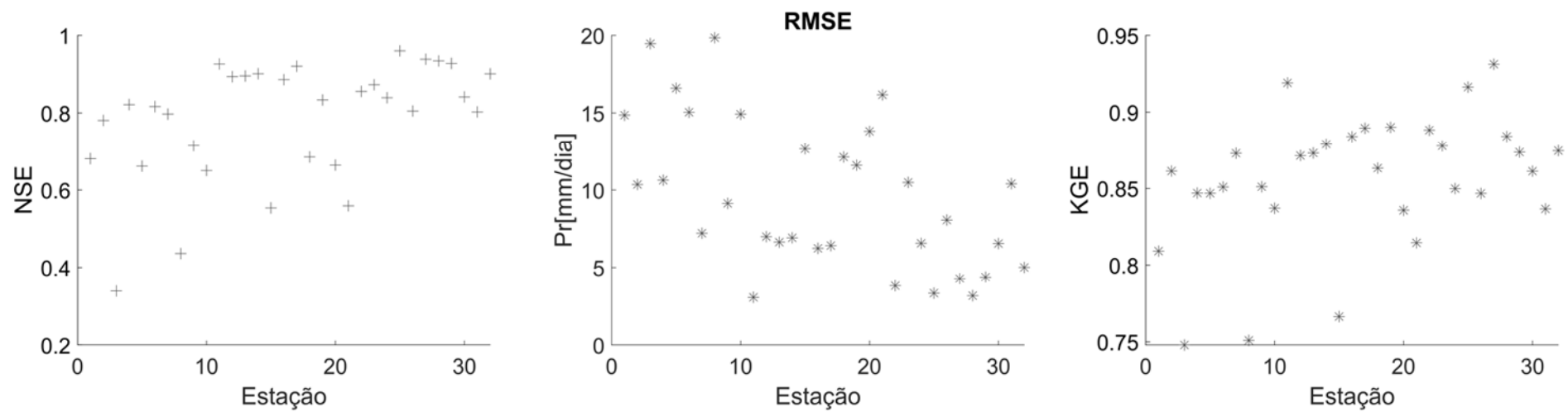
| SSP5-8.5         |         |       |         |      |                 |
|------------------|---------|-------|---------|------|-----------------|
| SIMULAÇÃO        | ÍNDICES |       | NOTAS   |      |                 |
| Cenário FS       | CDD     | CSDI  | CDD     | CSDI | MÉDIA DAS NOTAS |
| GFDL-CM4-R1      | 81,1%   | 10,6% | 5       | 2    | 3,5             |
| GFDL-ESM4-R1     | 51,0%   | 17,8% | 3       | 3    | 3               |
| MPI-ESM1-2-HR-R1 | 35,0%   | 20,4% | 2       | 4    | 3               |
| MPI-ESM1-2-HR-R2 | 25,4%   | 8,0%  | 1       | 1    | 1               |
| NorESM2-MM-R1    | 60,3%   | 32,9% | 4       | 5    | 4,5             |
| Cenário QS       | CDD     | WSDI  | CDD     | WSDI |                 |
| EC-Earth3-R105   | 66,0%   | 1,8%  | 3       | 1    | 2               |
| EC-Earth3-R122   | 69,7%   | 13,1% | 4       | 4    | 4               |
| EC-Earth3-R128   | 44,9%   | 16,9% | 1       | 5    | 3               |
| EC-Earth3-R141   | 49,0%   | 12,3% | 2       | 3    | 2,5             |
| EC-Earth3-Veg-R2 | 79,4%   | 9,8%  | 5       | 2    | 3,5             |
| Cenário QU       | R99PTOT | WSDI  | R99PTOT | WSDI |                 |
| CMCC-ESM2-R1     | 32,1%   | 5,4%  | 5       | 4    | 4,5             |
| EC-Earth3-R11    | 15,7%   | 12,5% | 4       | 5    | 4,5             |
| EC-Earth3-R124   | 11,7%   | 3,9%  | 2       | 2    | 2               |
| EC-Earth3-R131   | 14,8%   | 5,4%  | 3       | 3    | 3               |
| EC-Earth3-R149   | 10,2%   | -3,3% | 1       | 1    | 1               |
| Cenário FU       | R99PTOT | CSDI  | R99PTOT | CSDI |                 |
| EC-Earth3-R109   | 15,3%   | 27,1% | 2       | 4    | 3               |
| EC-Earth3-R116   | 15,7%   | 12,5% | 3       | 2    | 2,5             |
| EC-Earth3-R138   | 19,7%   | 21,2% | 4       | 3    | 3,5             |
| MRI-ESM2-0-R1    | 21,5%   | 10,0% | 5       | 1    | 3               |
| NorESM2-MM-R1    | 2,8%    | 32,9% | 1       | 5    | 3               |

## **APÊNDICE 5: MÉTRICAS DE ERRO DA ANÁLISE DE FREQUÊNCIA POR ESTAÇÃO**

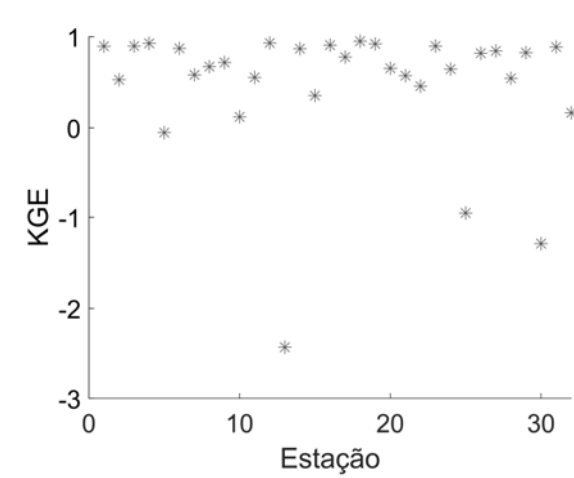
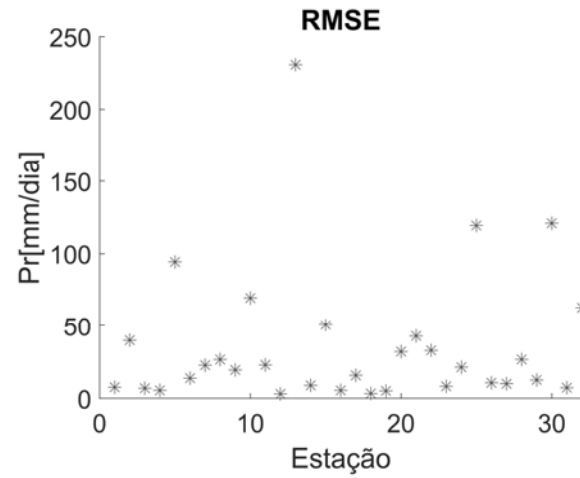
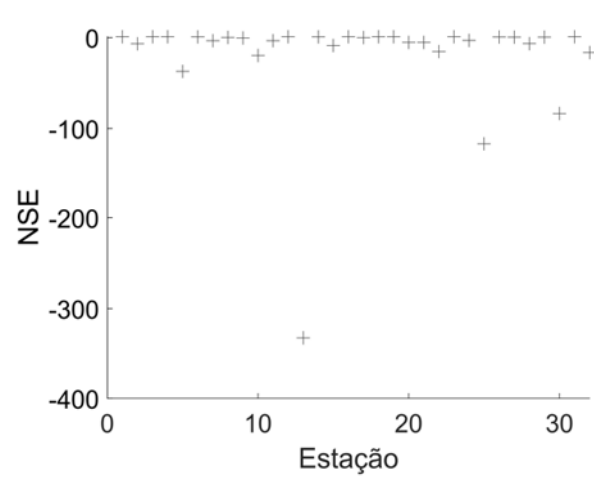
### Método Delta, Cenário de emissão SSP1-2.6.



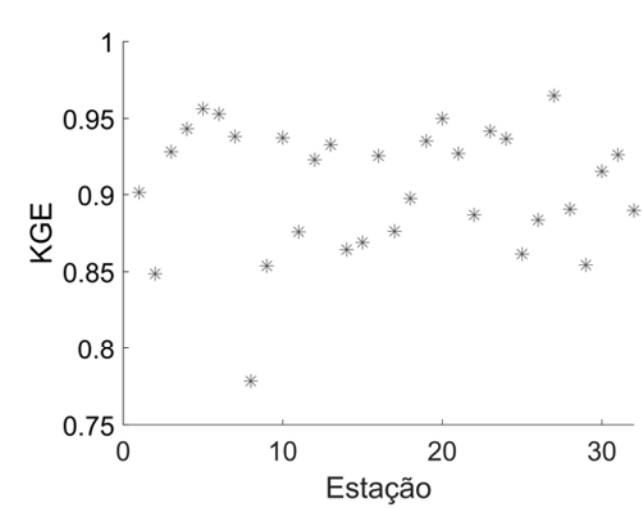
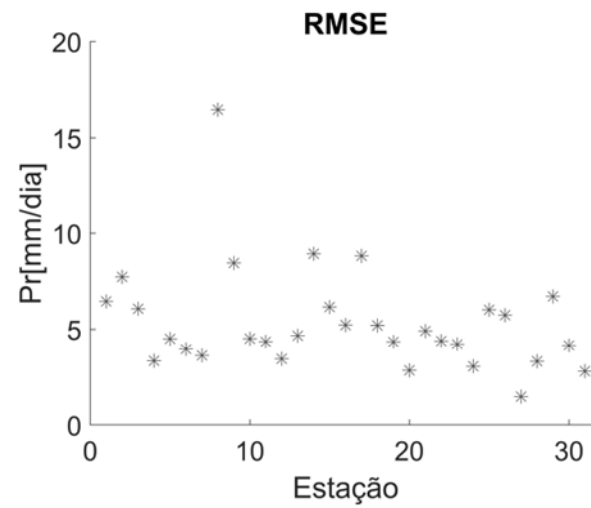
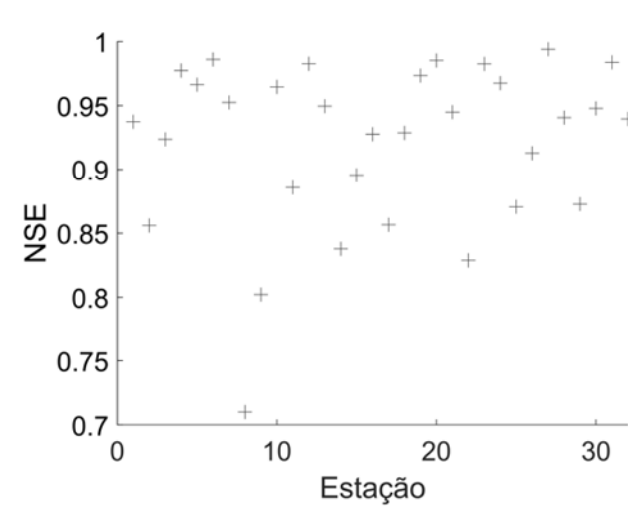
### Redução de escala QQ, Cenário de emissão SSP1-2.6



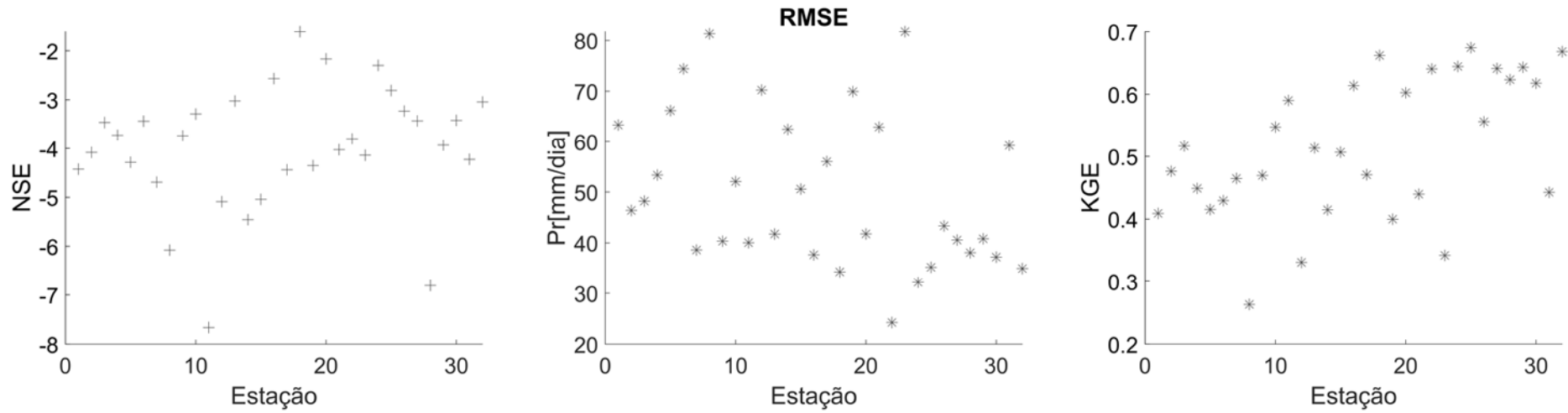
### Redução de escala PG, Cenário de emissão SSP1-2.6.



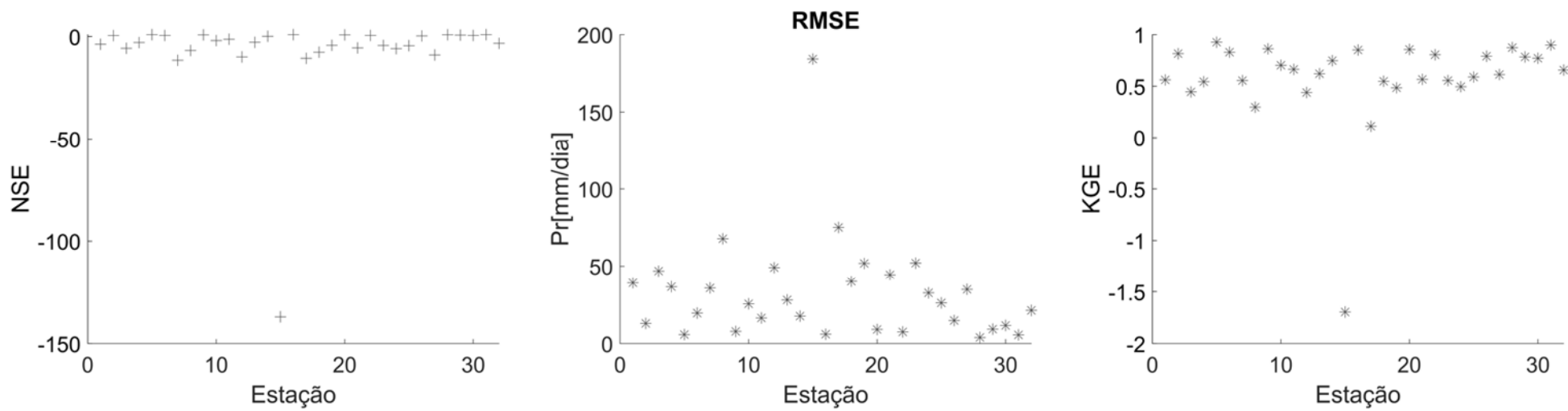
### Redução de escala AR, Cenário de emissão SSP1-2.6



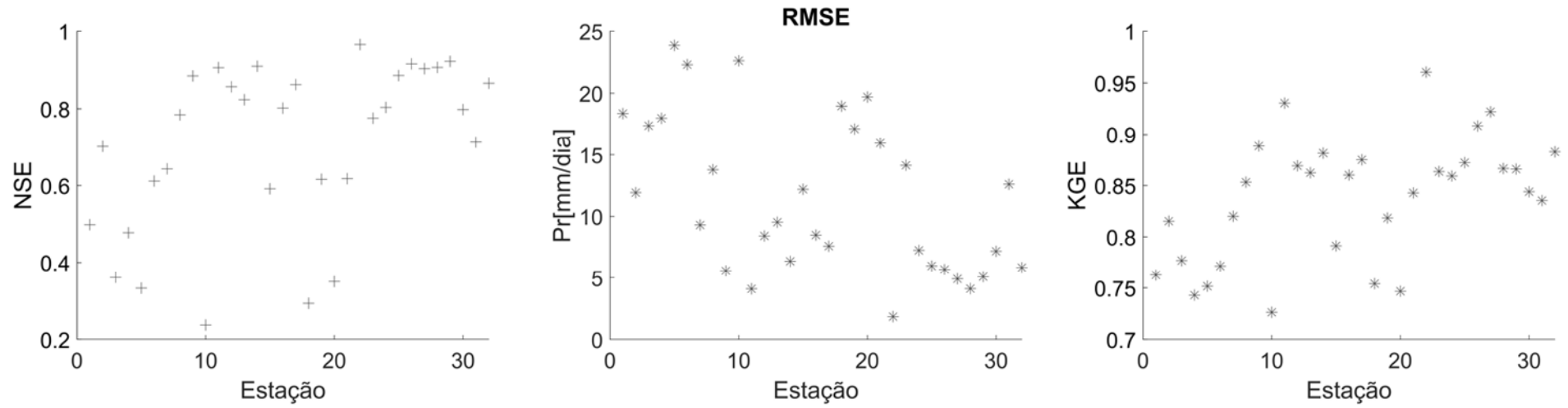
**Método Delta, Cenário de emissão SSP5-8.5.**



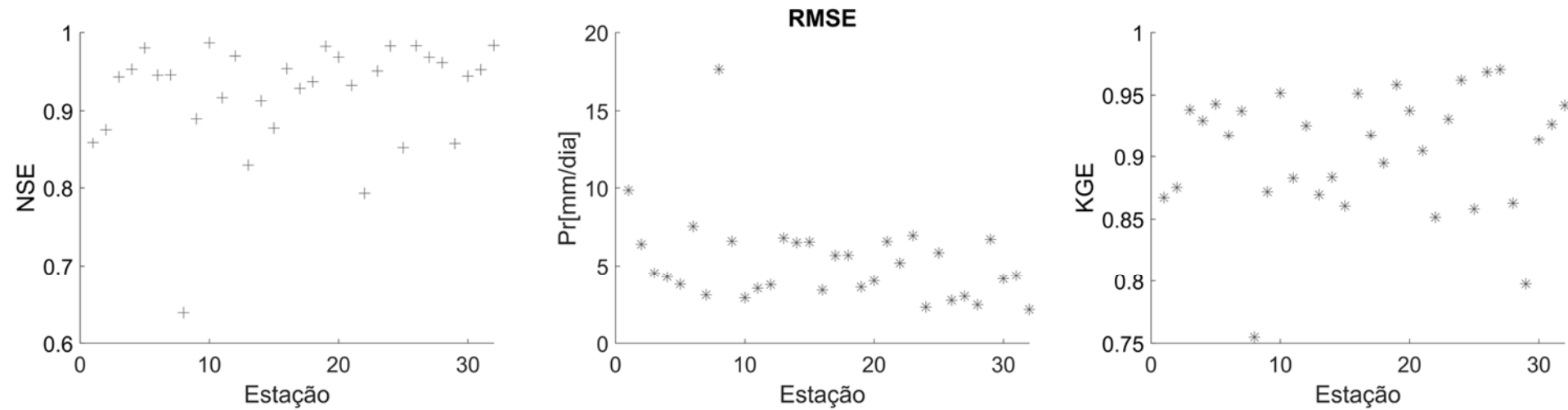
**Redução de escala QQ, Cenário de emissão SSP5-8.5**



### Redução de escala PG, Cenário de emissão SSP5-8.5



### Redução de escala AR, Cenário de emissão SSP5-8.5



## APÊNDICE 5: ANÁLISE DE FREQUÊNCIA HISTÓRICA

| Estação  | FPA        | Homogeneidade                       |       | Estacionariedade                    |       | Independência                       |       |
|----------|------------|-------------------------------------|-------|-------------------------------------|-------|-------------------------------------|-------|
|          |            | Hipótese nula aceita<br>$ T  < T_c$ | T     | Hipótese nula aceita<br>$ T  < T_c$ | T     | Hipótese nula aceita<br>$ T  < T_c$ | T     |
| 01943000 | Gum        | Sim                                 | -1,7  | Sim                                 | 2,26  | Sim                                 | 1,34  |
| 01943004 | Gum        | Sim                                 | -0,08 | Sim                                 | 0,23  | Sim                                 | -0,05 |
| 01943006 | Gum        | Não                                 | -3,08 | Sim                                 | 2,2   | Sim                                 | 0,96  |
| 01943009 | Gum        | Sim                                 | -0,42 | Sim                                 | 0,54  | Sim                                 | 1,39  |
| 01943010 | Gum        | Sim                                 | -0,25 | Sim                                 | -0,12 | Sim                                 | 0,24  |
| 01943022 | Gum        | Sim                                 | -0,76 | Sim                                 | 0,27  | Sim                                 | -0,34 |
| 01943024 | Gum        | Sim                                 | -2,09 | Sim                                 | 1,21  | Sim                                 | 1,99  |
| 01943042 | Gum        | Sim                                 | -0,83 | Sim                                 | 0,8   | Não                                 | 2,42  |
| 01943049 | Gum        | Sim                                 | -1,02 | Sim                                 | -1,6  | Sim                                 | 0,52  |
| 01943055 | Gum        | Sim                                 | 0     | Sim                                 | -0,54 | Sim                                 | -1,06 |
| 01944004 | Gamma      | Sim                                 | -1,41 | Sim                                 | -0,98 | Sim                                 | 1,08  |
| 01944007 | Gum        | Sim                                 | -0,55 | Sim                                 | -0,21 | Sim                                 | 0,29  |
| 01944009 | Gum        | Sim                                 | -0,25 | Sim                                 | 1,25  | Sim                                 | 0,81  |
| 01944026 | Gum        | Sim                                 | -1,07 | Sim                                 | -0,42 | Sim                                 | -0,14 |
| 01944027 | Gum        | Sim                                 | -1,3  | Sim                                 | -1,44 | Sim                                 | -0,55 |
| 01944055 | Gum        | Sim                                 | -0,49 | Sim                                 | 0,45  | Sim                                 | 1,23  |
| 01944062 | Gum        | Sim                                 | -1,52 | Sim                                 | -1,54 | Sim                                 | 0,44  |
| 02043002 | Gum        | Sim                                 | -0,42 | Sim                                 | 0,42  | Não                                 | 2,44  |
| 02043004 | Gum        | Sim                                 | -1,46 | Sim                                 | -0,74 | Não                                 | 2,33  |
| 02043042 | Gum        | Sim                                 | -0,28 | Sim                                 | -0,25 | Não                                 | 2,97  |
| 02043043 | Log-Normal | Sim                                 | -1,18 | Sim                                 | -1,29 | Sim                                 | 2,09  |
| 02044008 | Log-Normal | Sim                                 | -1,64 | Sim                                 | 1,39  | Sim                                 | 1,05  |
| 02044012 | Gum        | Sim                                 | -0,78 | Sim                                 | -0,51 | Sim                                 | 0,12  |
| 02044016 | Gum        | Sim                                 | -1,04 | Sim                                 | 1,07  | Sim                                 | -0,99 |
| 02044019 | Gum        | Não                                 | -2,44 | Sim                                 | -2,16 | Sim                                 | 1,51  |
| 02044020 | Gum        | Sim                                 | -1,79 | Sim                                 | -1,83 | Sim                                 | 0,4   |
| 02044021 | Log-Normal | Não                                 | -2,33 | Não                                 | -2,8  | Sim                                 | 1,05  |
| 02044024 | Gamma      | Sim                                 | -1,21 | Sim                                 | -0,67 | Sim                                 | -0,26 |
| 02044043 | Gum        | Sim                                 | -0,59 | Sim                                 | -0,02 | Sim                                 | 1,78  |
| 02044052 | Log-Normal | Sim                                 | -2,28 | Sim                                 | -2,12 | Sim                                 | -1,23 |
| 02044053 | Gum        | Sim                                 | -1,79 | Sim                                 | -1,25 | Sim                                 | 0,9   |
| 02044054 | Gum        | Sim                                 | -1,1  | Sim                                 | -1,36 | Sim                                 | 0,28  |

$T_c = z \left( 1 - \frac{\alpha}{2} \right)$ ; sendo z a função normal padrão e  $\alpha$  o nível de significância (2%)

$$T_c = z \left( 1 - \frac{0,02}{2} \right) = 2.3263$$

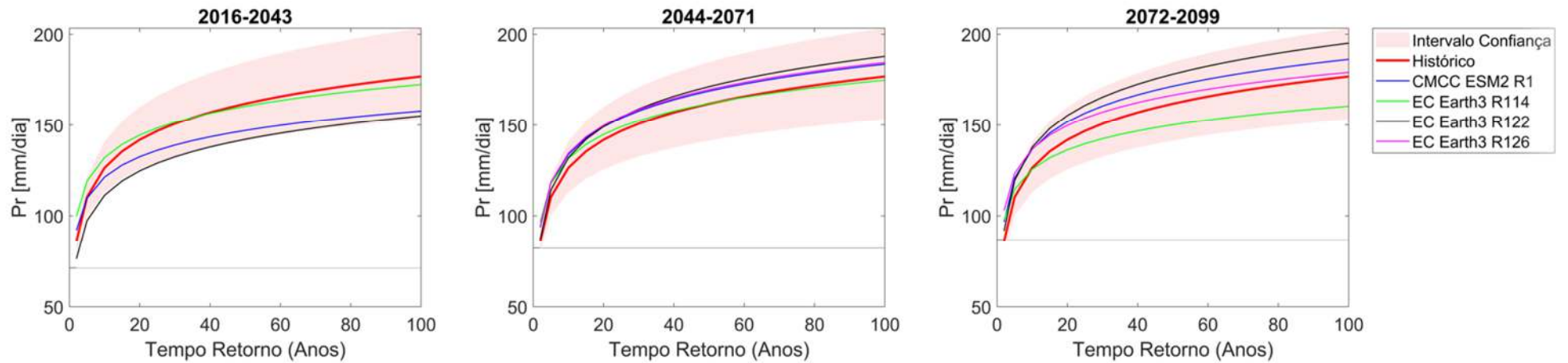
## **APÊNDICE 6: FREQUENCIAS DE OCORRÊNCIA HISTÓRICAS E PROJETADAS<sup>1</sup>**

---

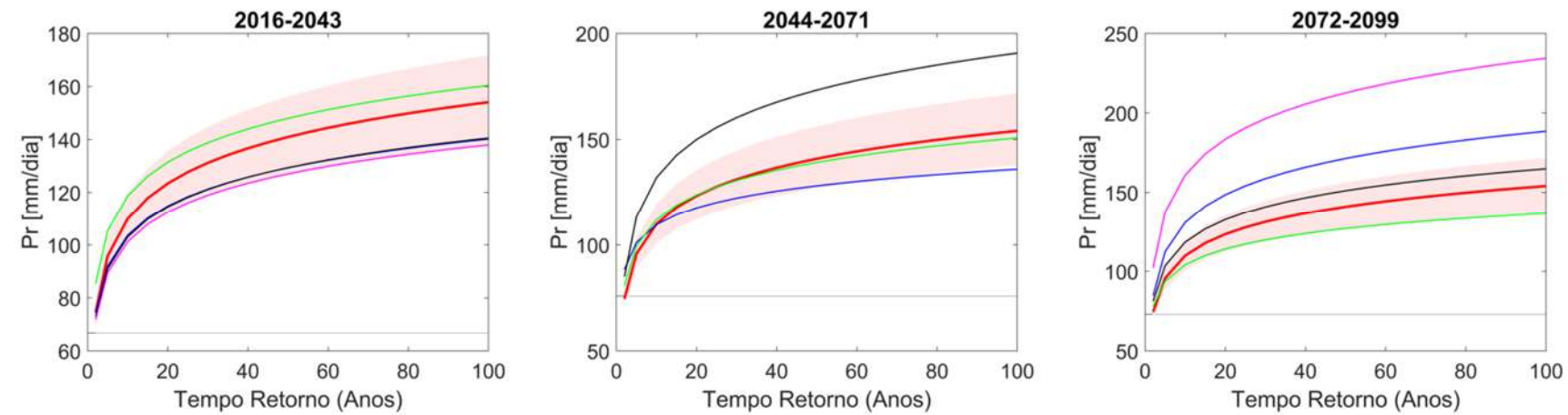
<sup>1</sup> Em cada cenário de emissão os possíveis futuros climáticos são representados com as simulações da Tabela 5-6

## CENÁRIO DE EMISSÃO SSP1-2.6

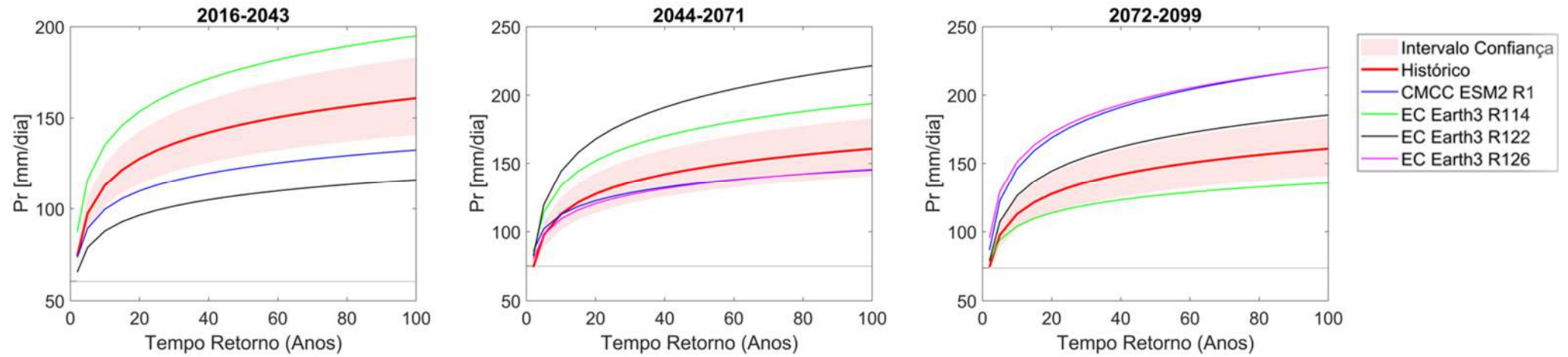
Estação 01943000



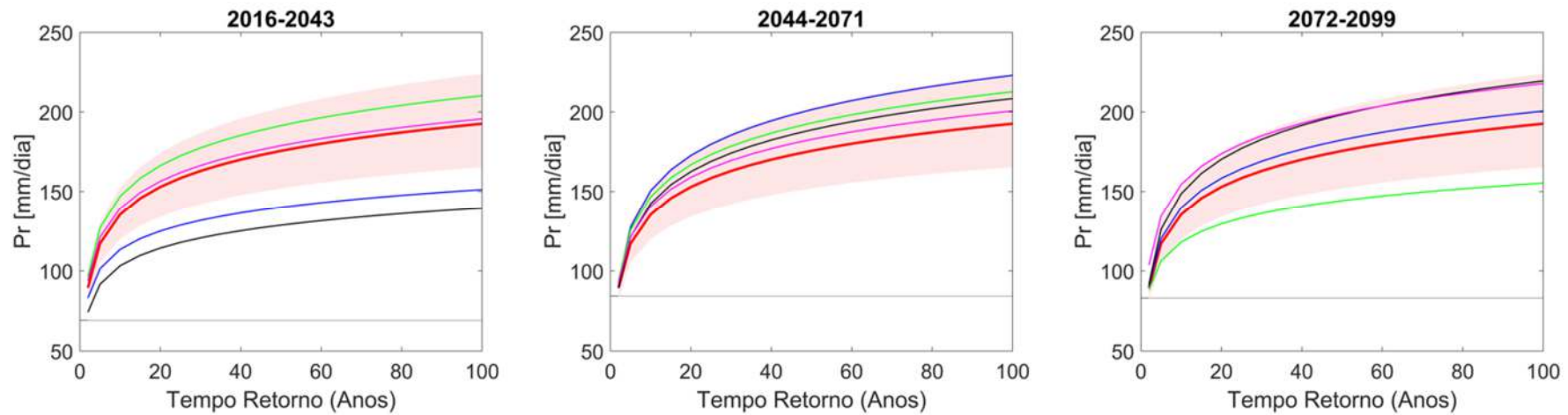
Estação 01943004



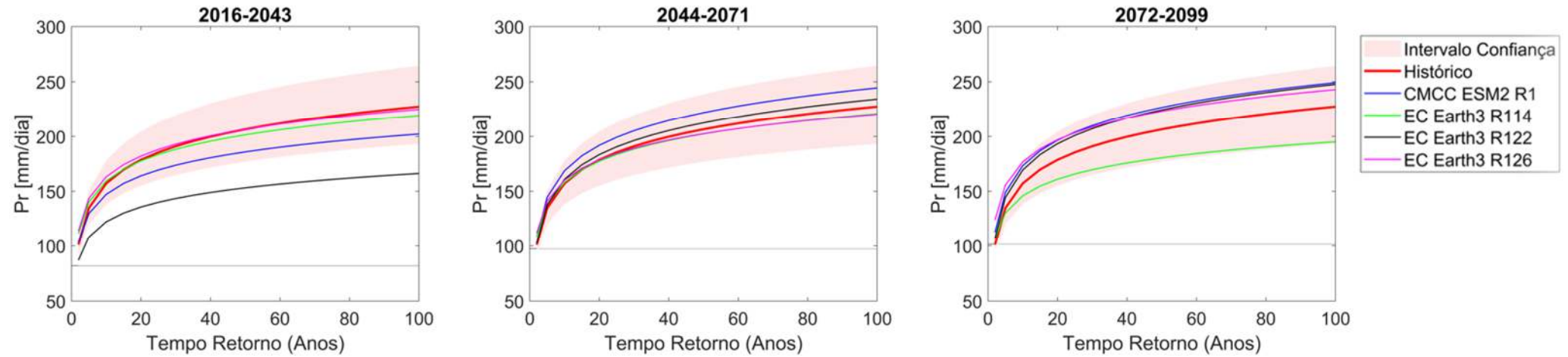
**Estação 01943009**



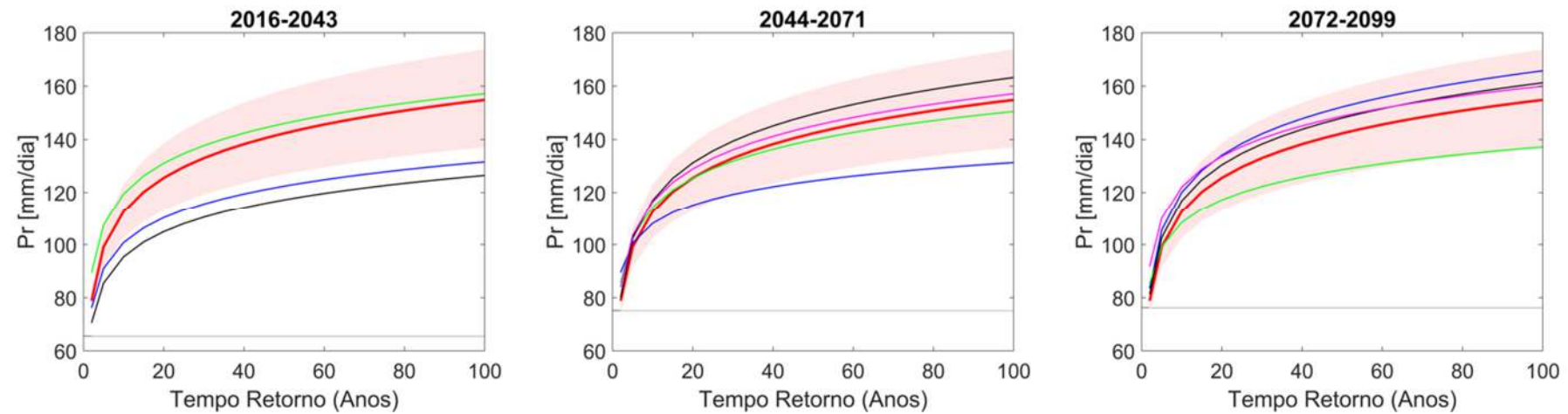
**Estação 019430010**



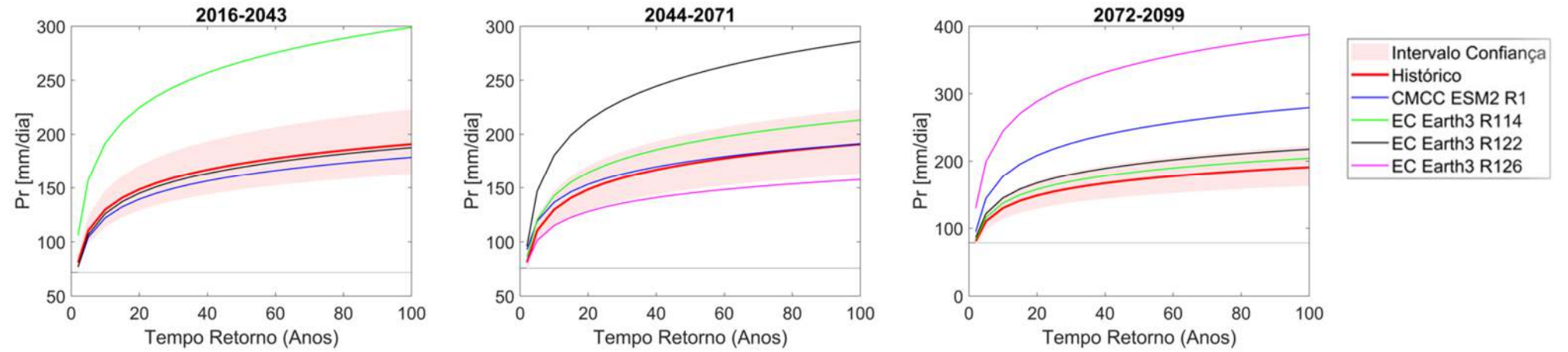
**Estação 01943022**



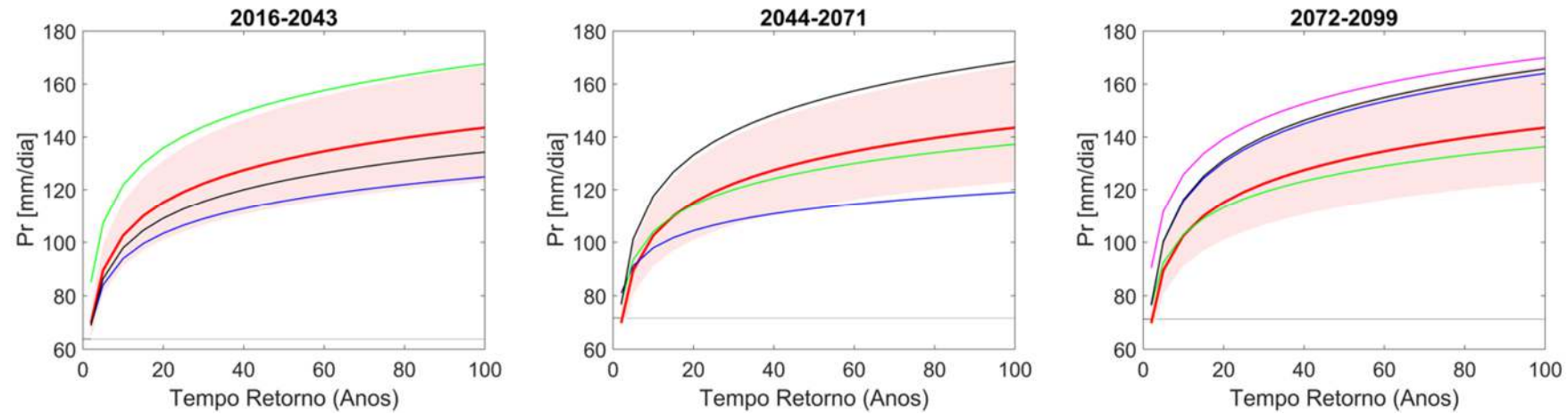
**Estação 01943024**



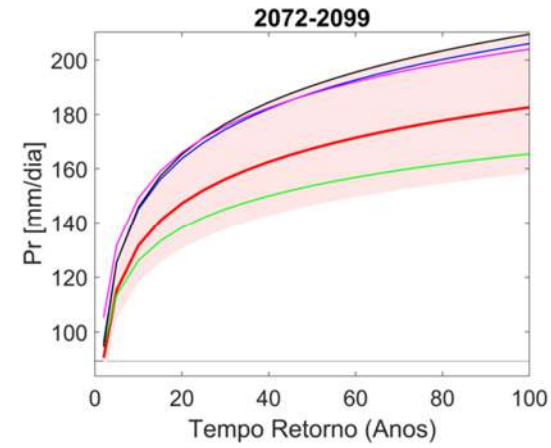
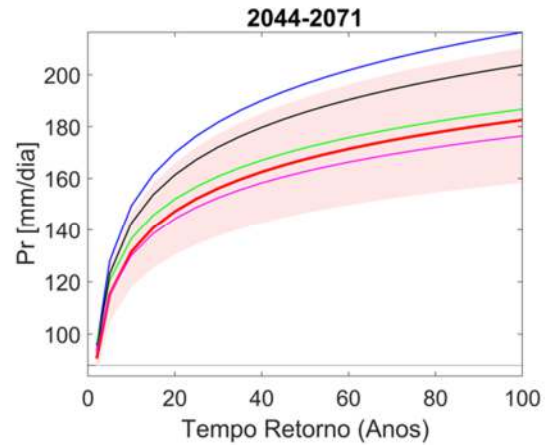
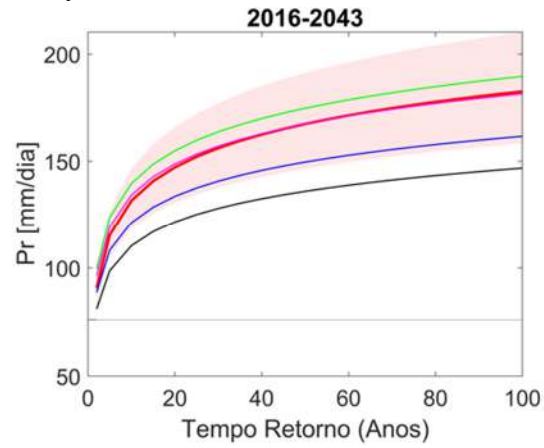
**Estação 01943042**



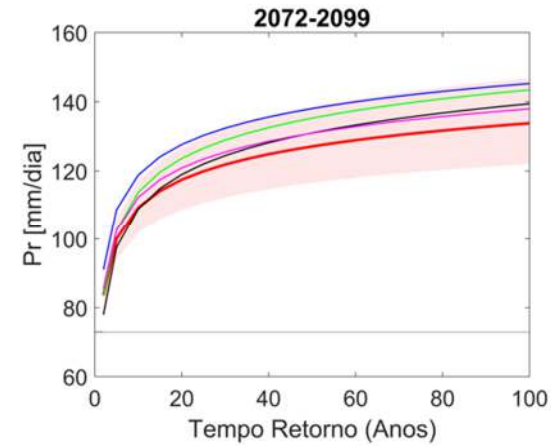
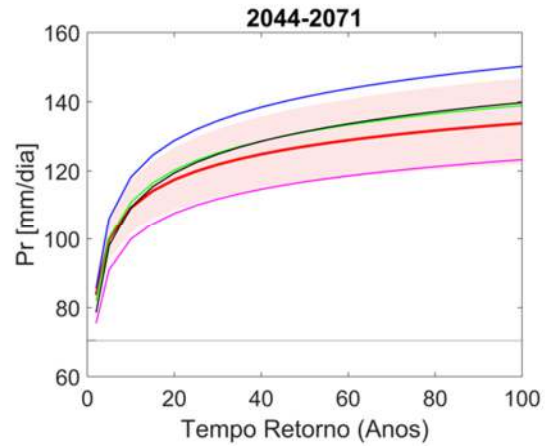
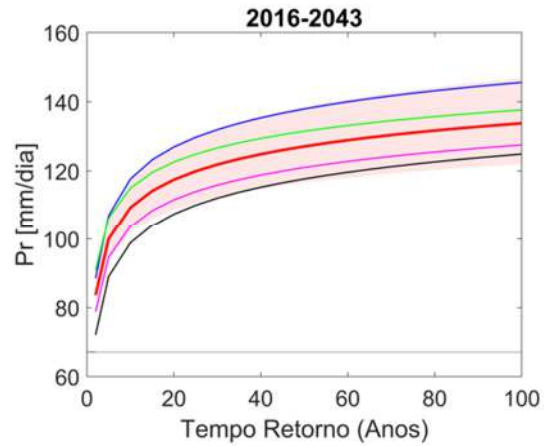
**Estação 01943049**



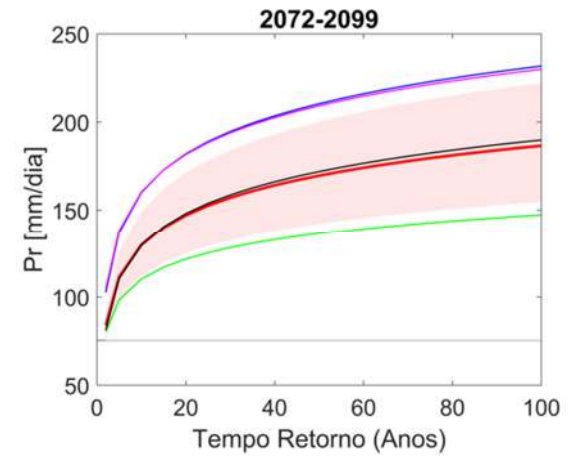
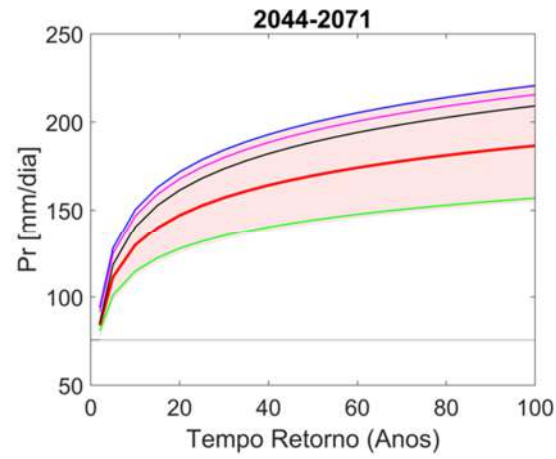
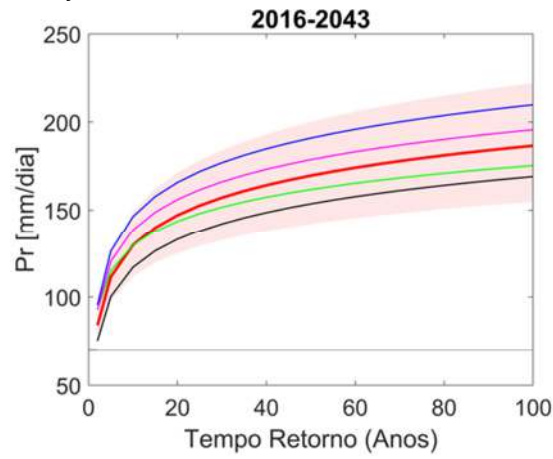
**Estação 01943055**



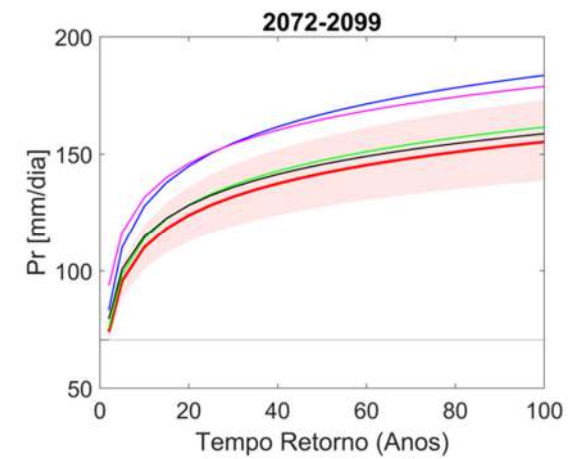
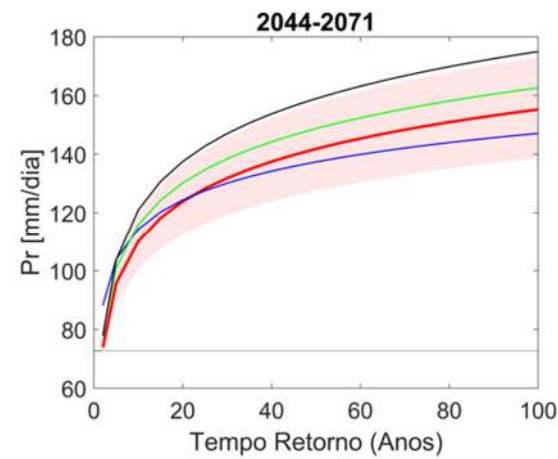
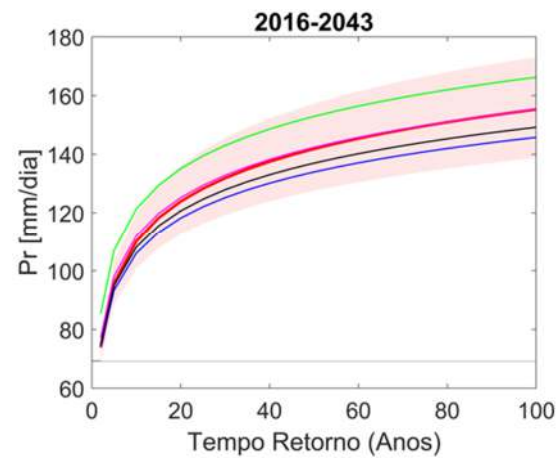
**Estação 01944004**



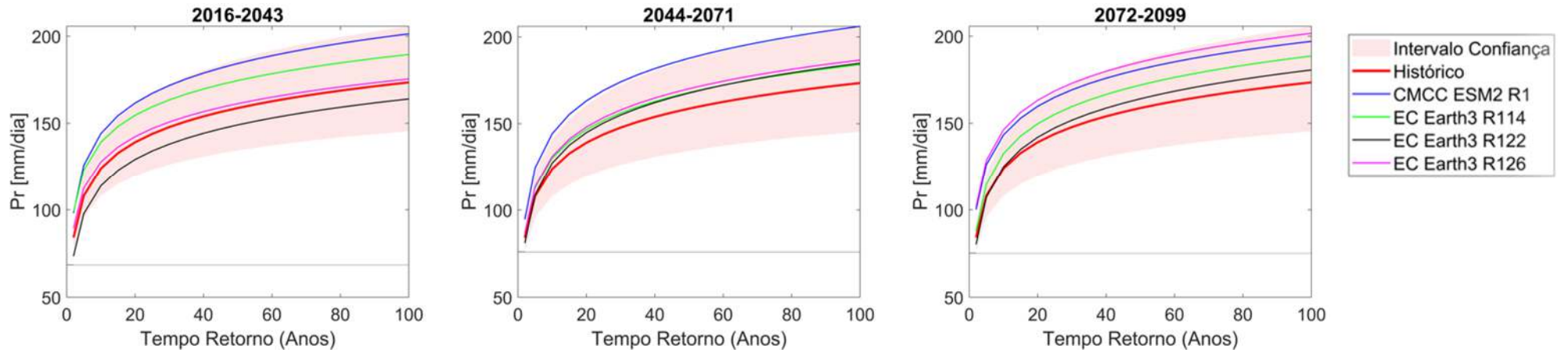
**Estação 01944007**



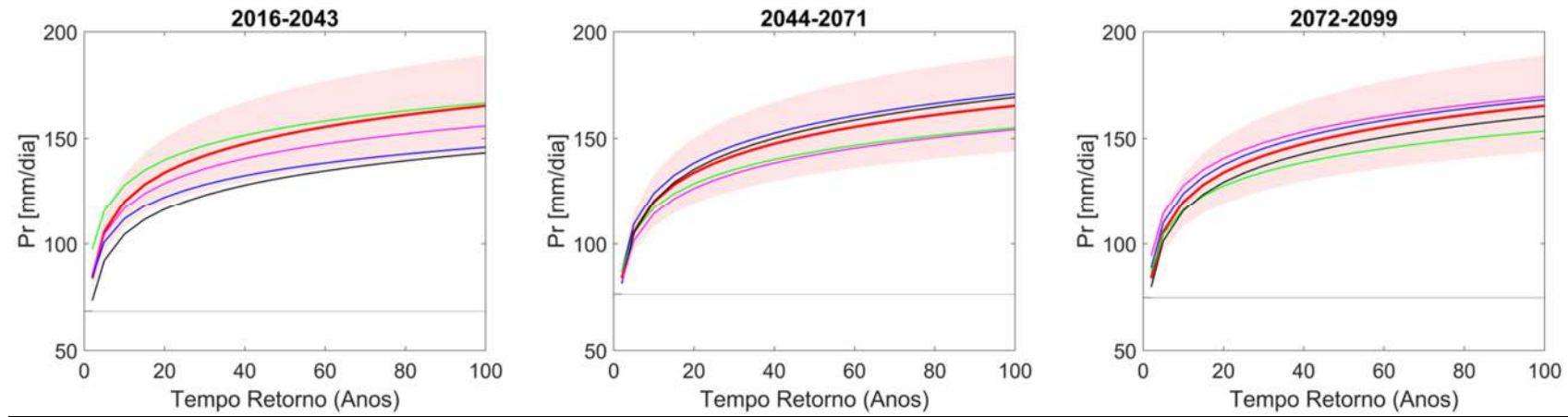
**Estação 01944009**



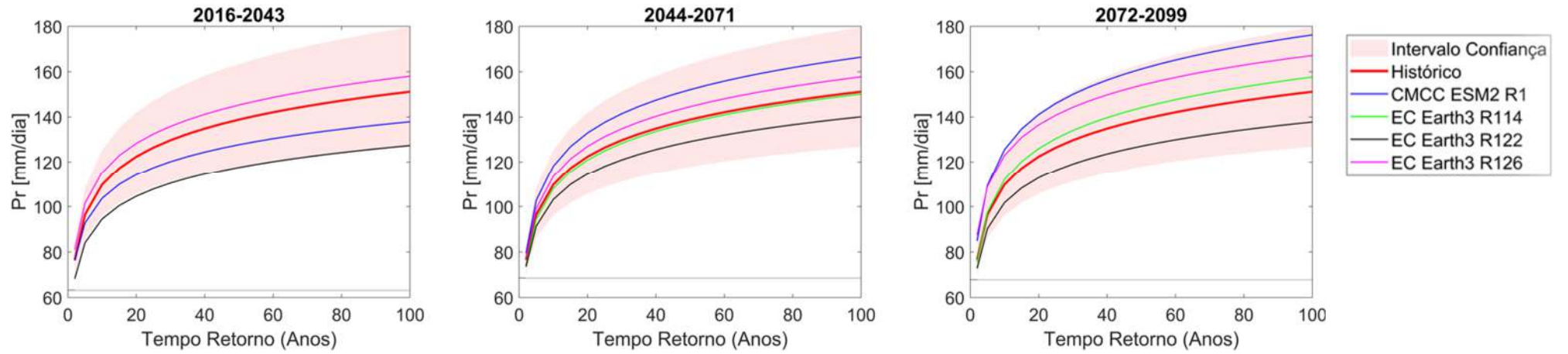
**Estação 01944026**



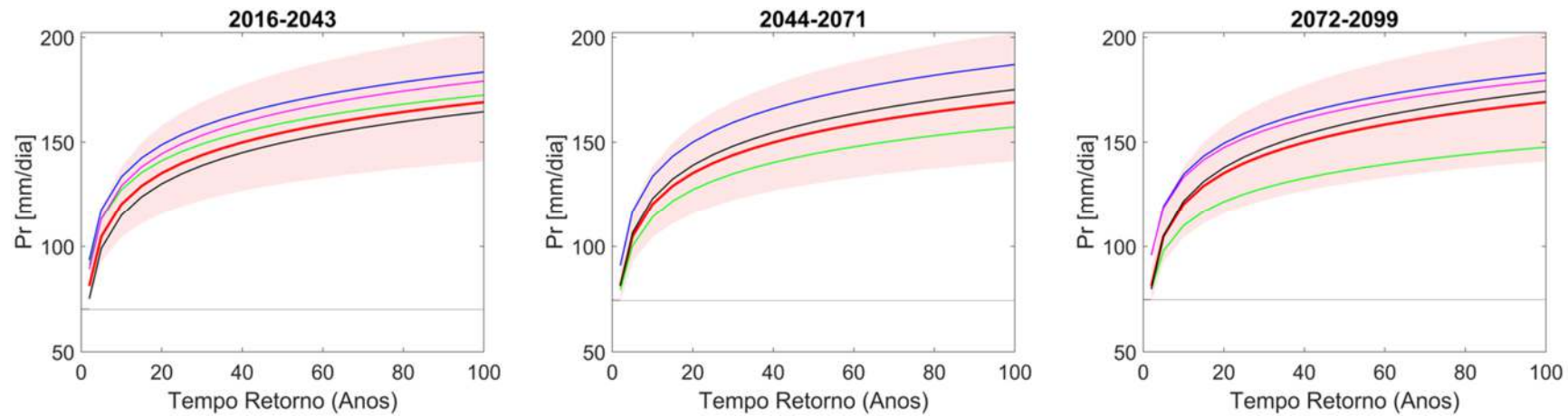
**Estação 01944027**



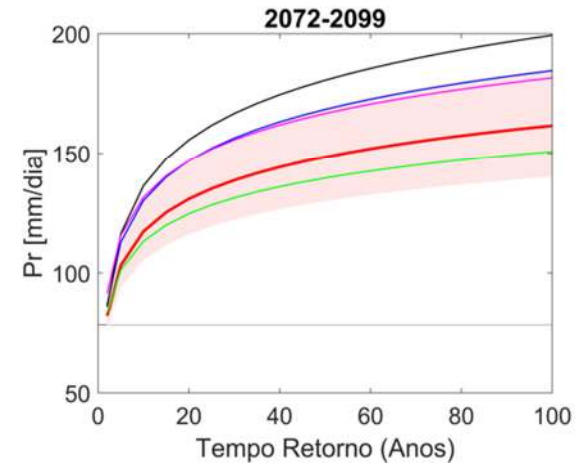
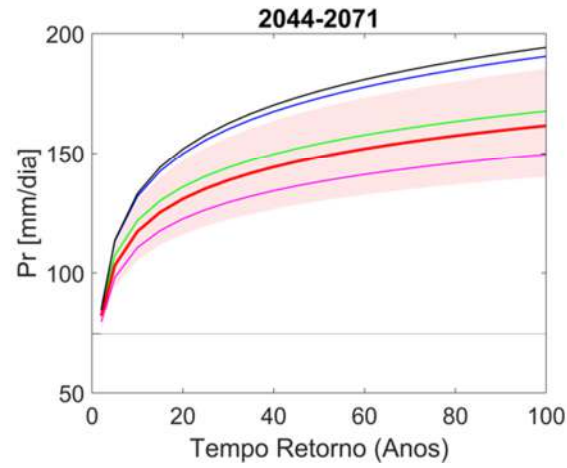
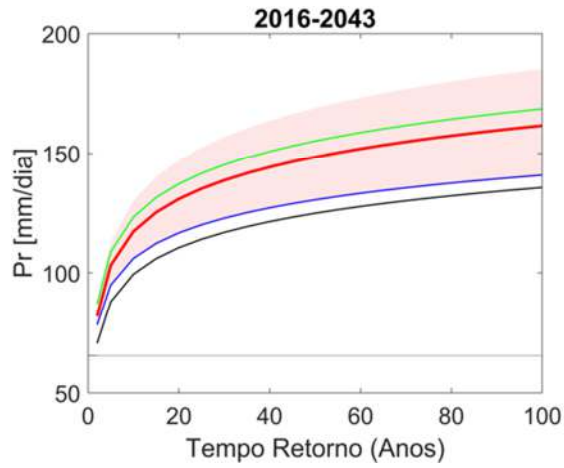
**Estação 01944055**



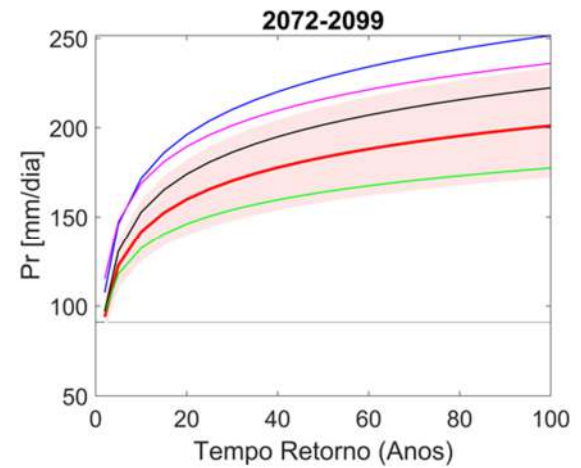
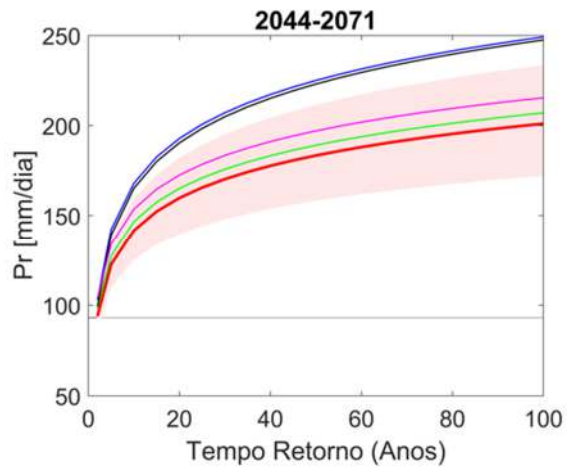
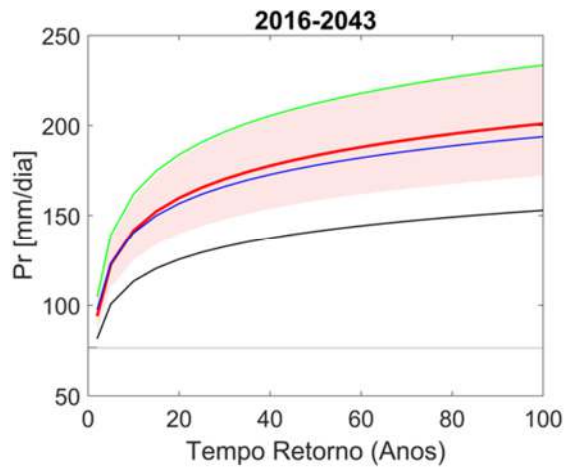
**Estação 01944062**



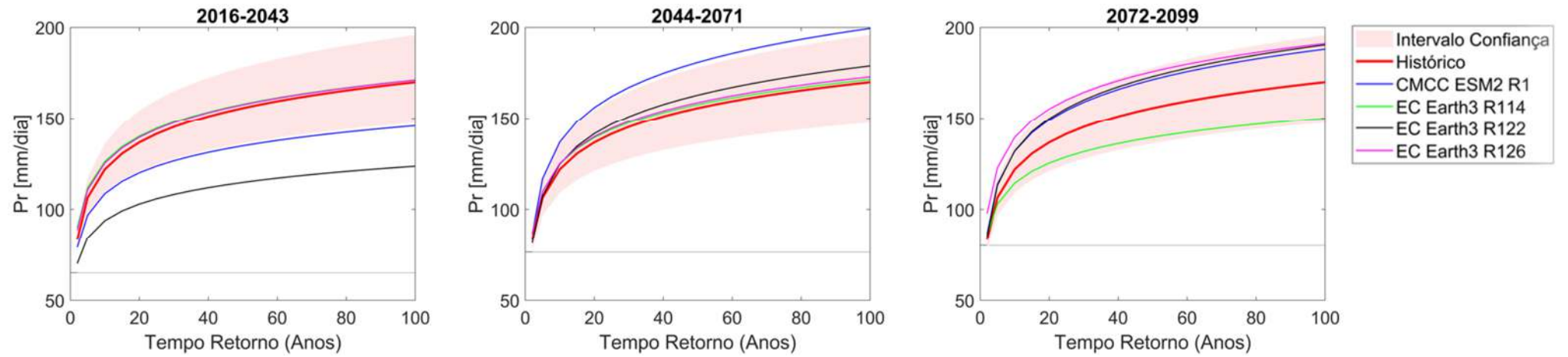
**Estação 02043002**



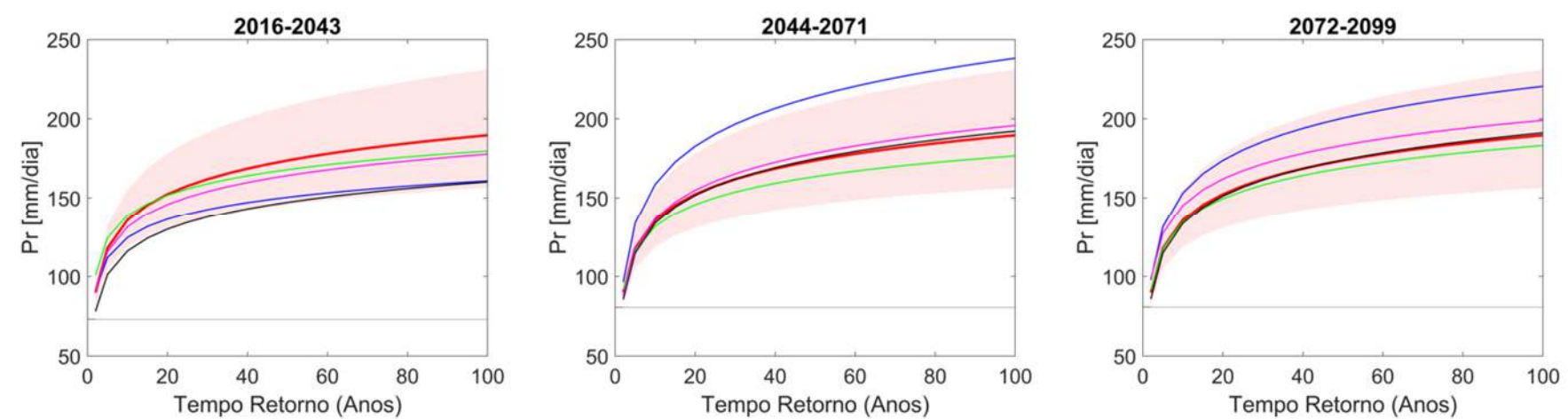
**Estação 02043004**



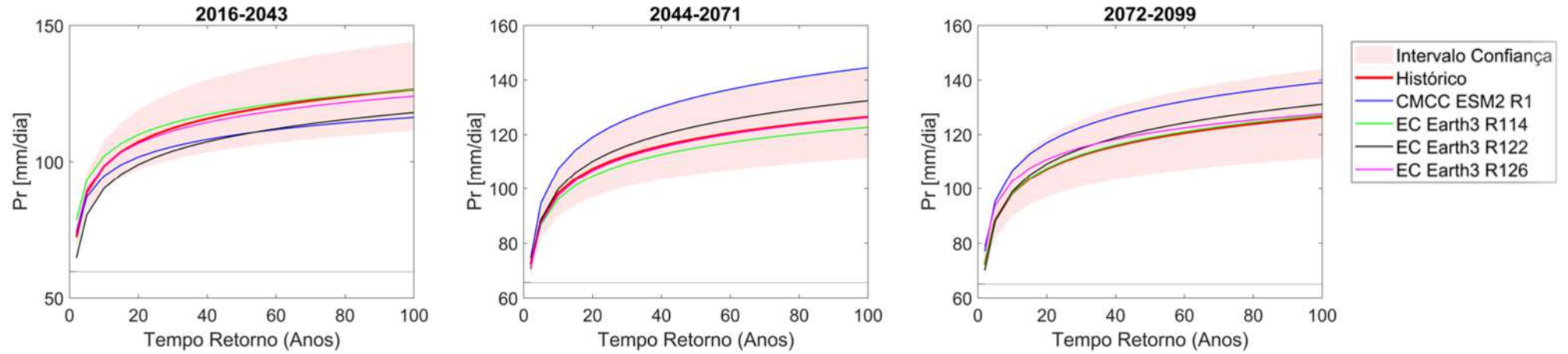
**Estação 02043042**



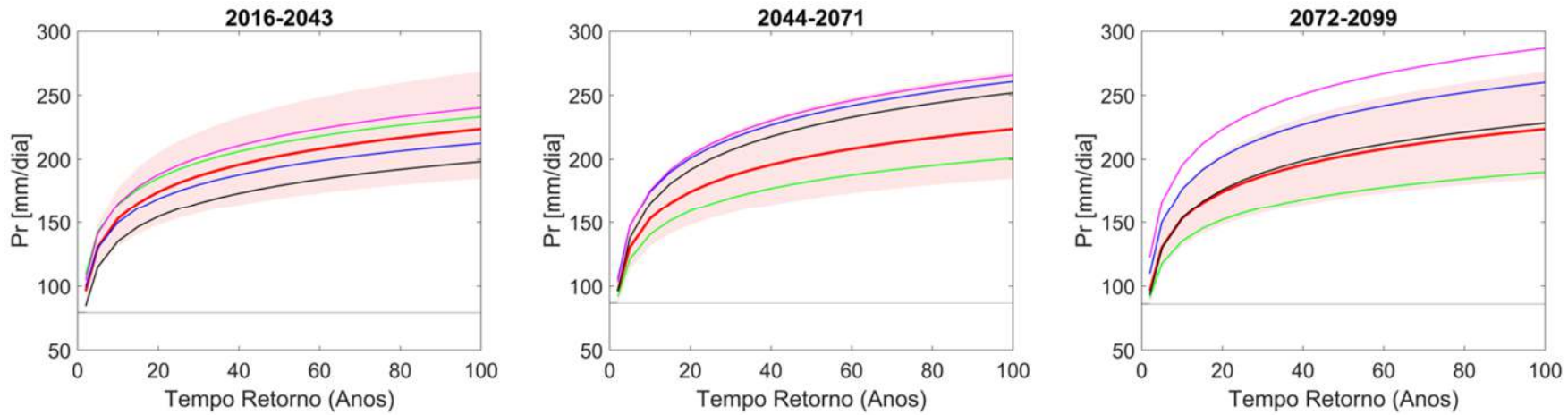
**Estação 02043043**



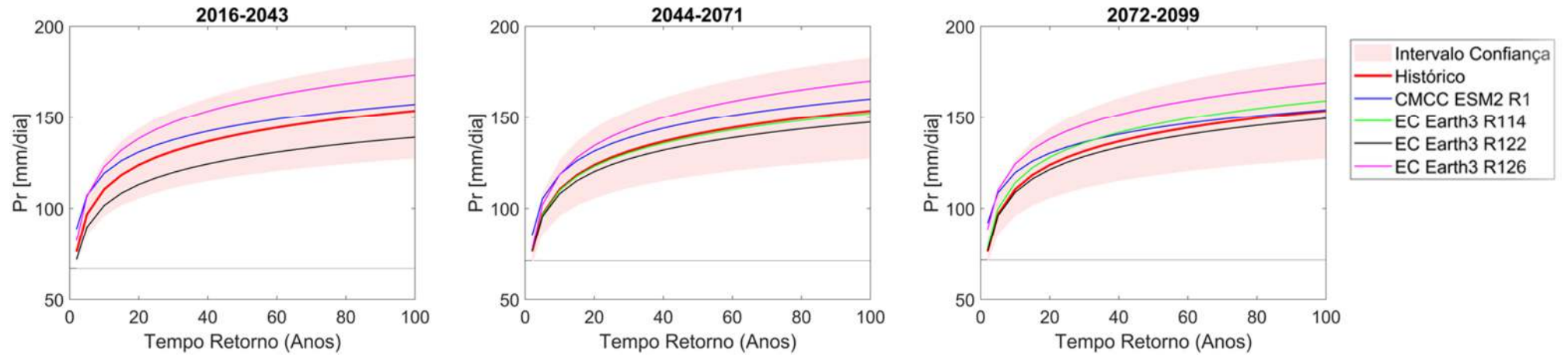
**Estação 02044008**



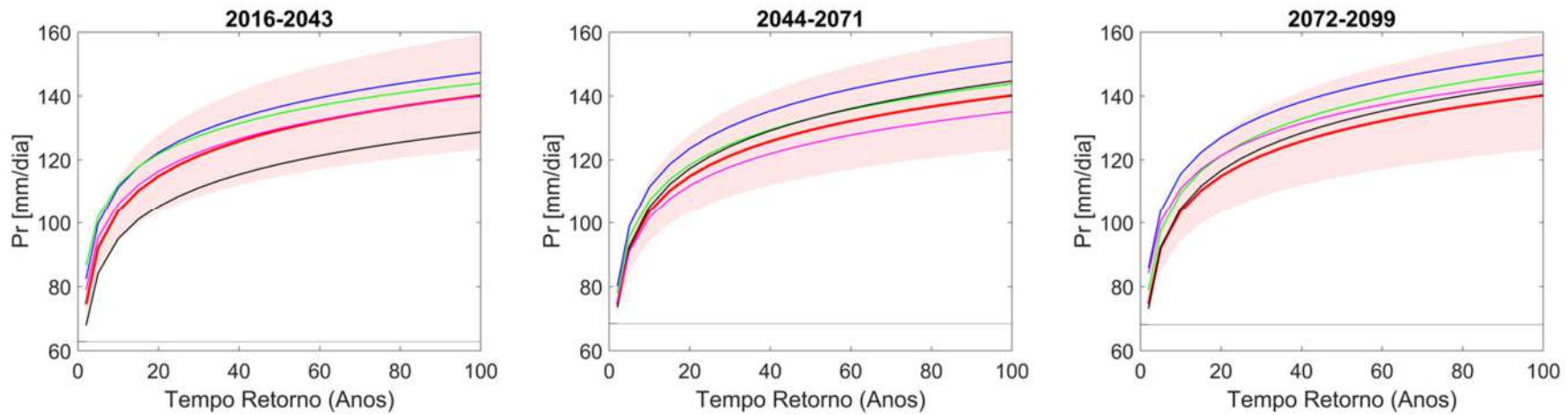
**Estação 02044012**



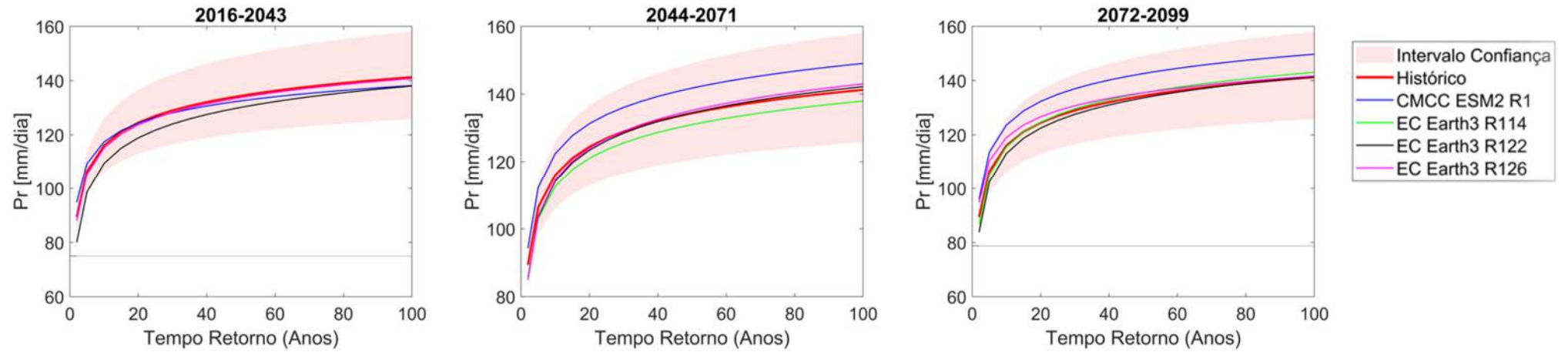
**Estação 02044016**



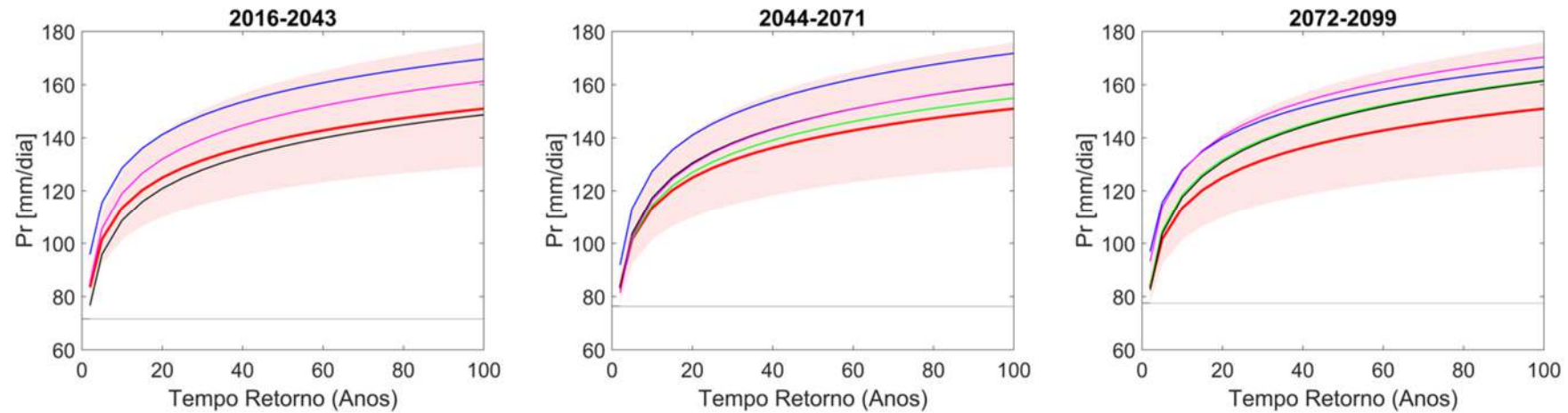
**Estação 02044020**



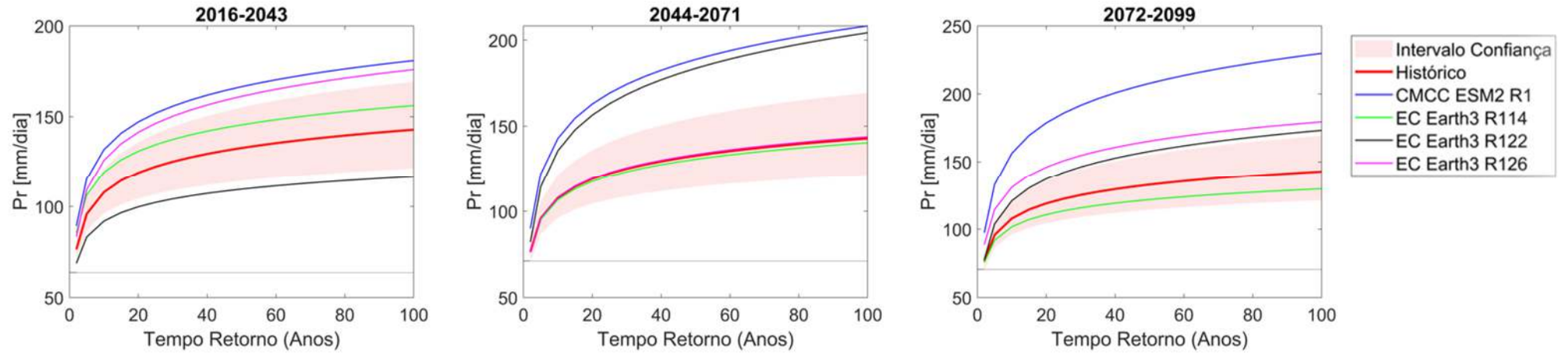
**Estação 02044024**



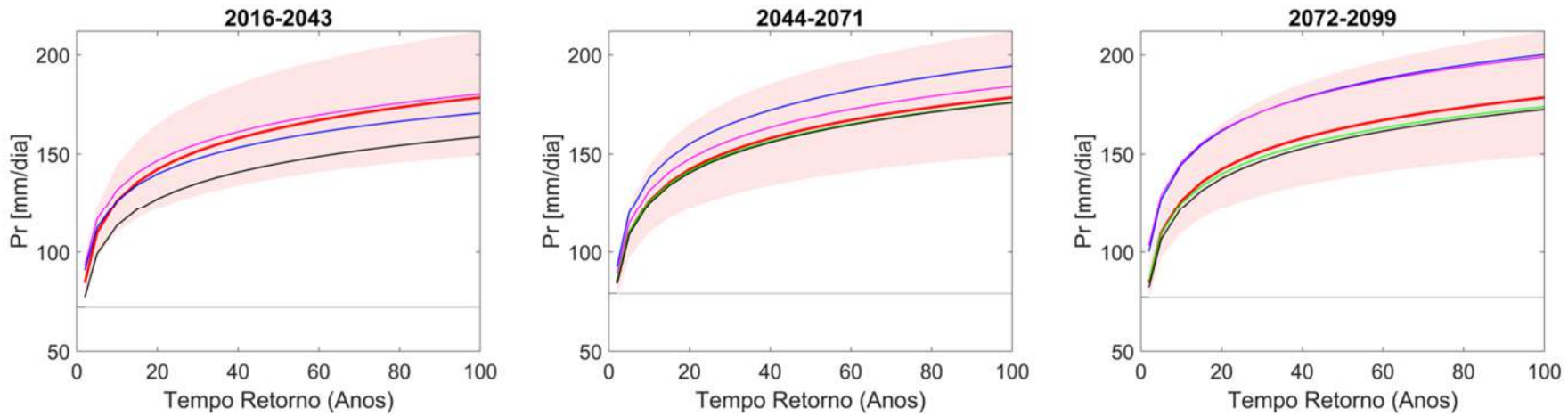
**Estação 02044043**



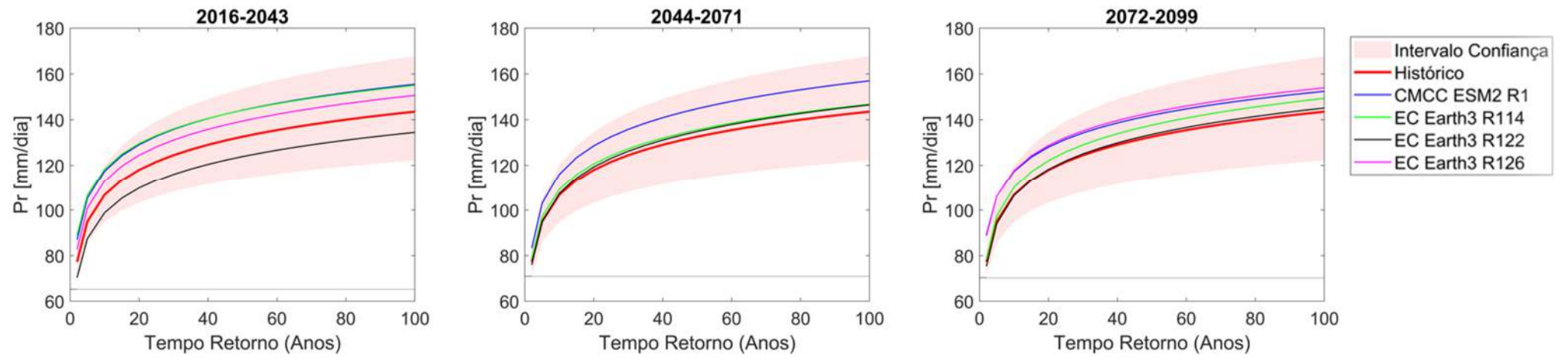
**Estação 02044052**



**Estação 02044053**

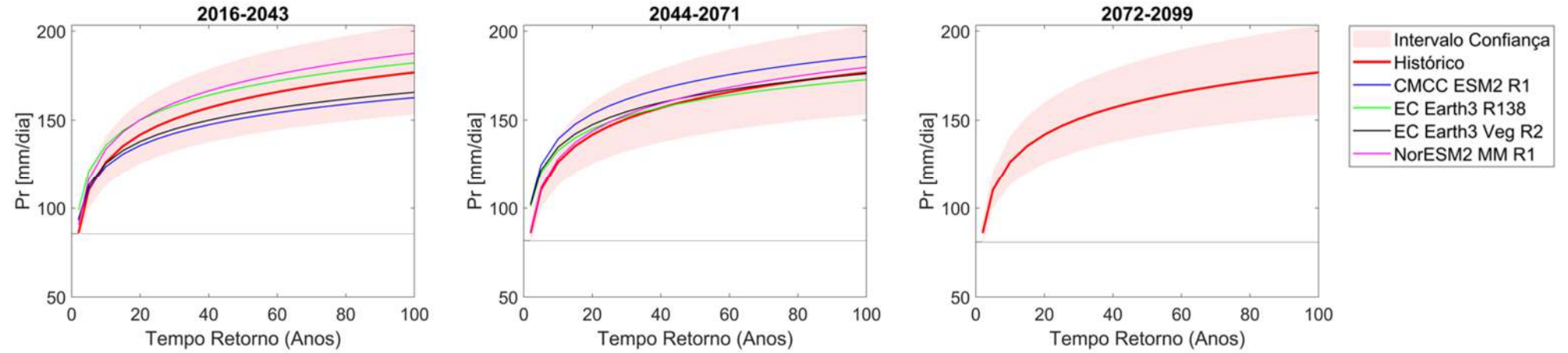


Estação 02044054

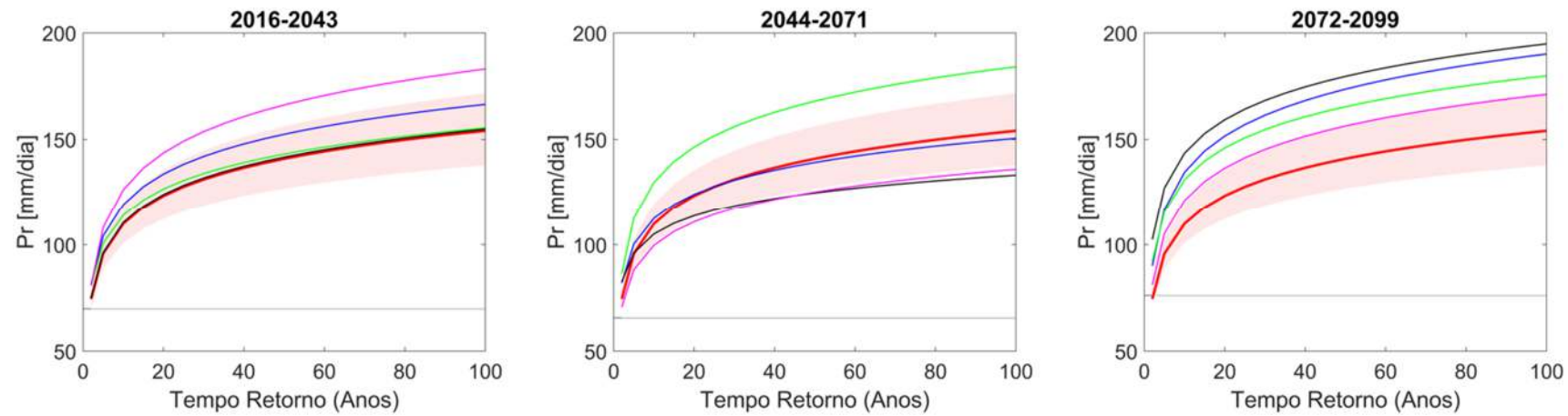


## CENÁRIO DE EMISSÃO SSP5-8.5

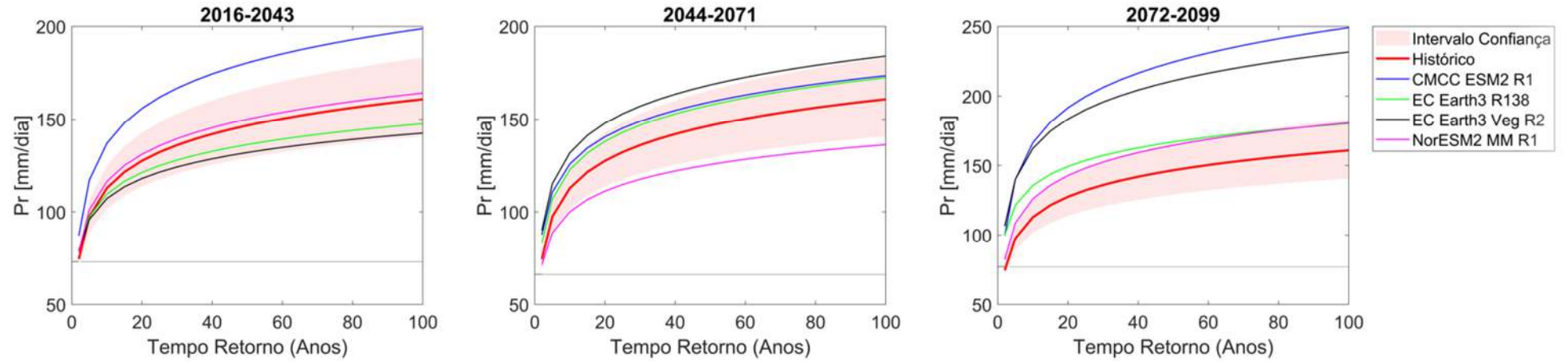
### Estação 01943000



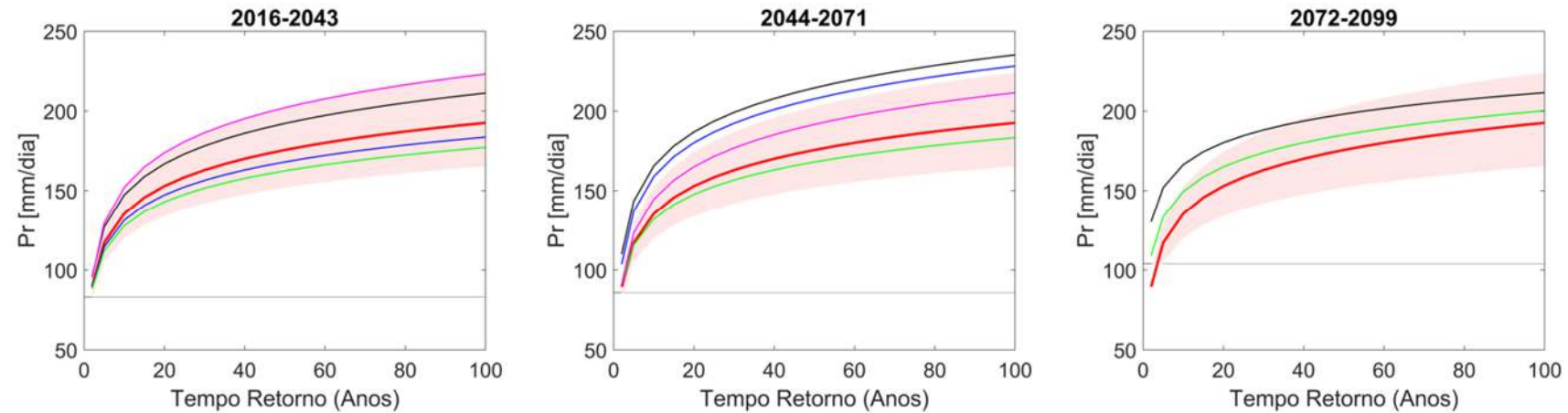
### Estação 01943004



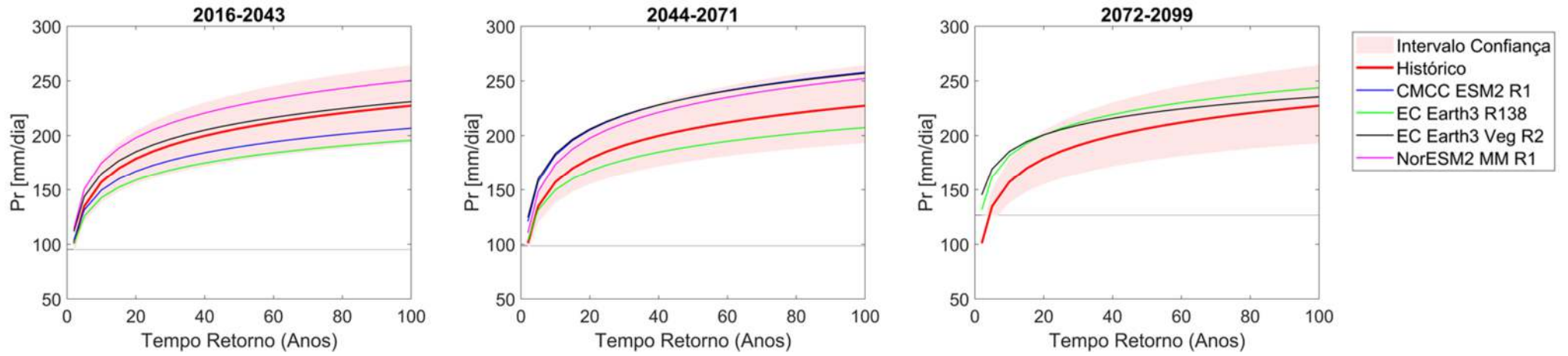
**Estação 01943009**



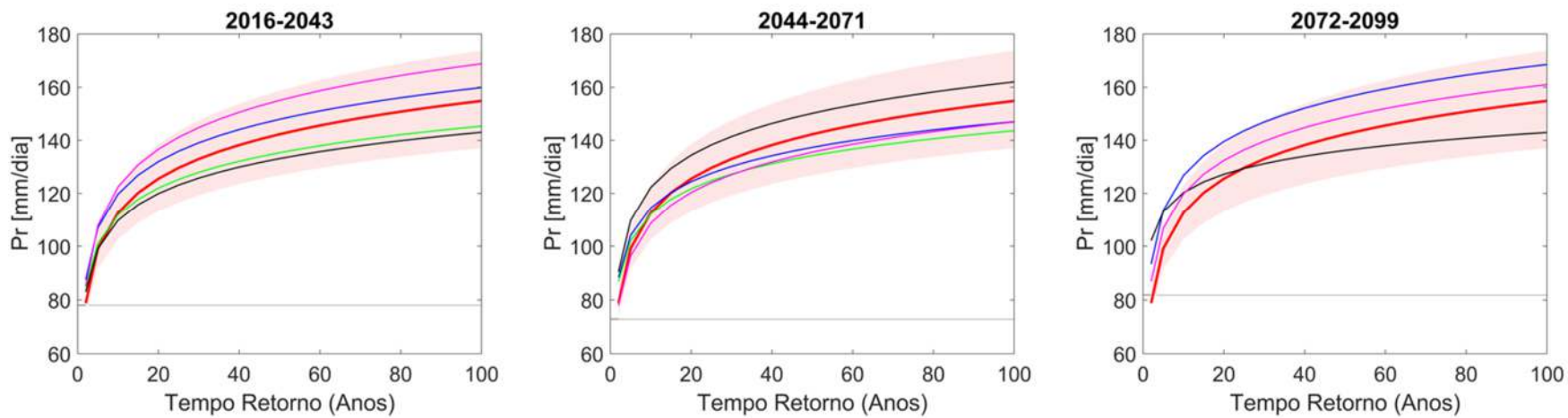
**Estação 01943010**



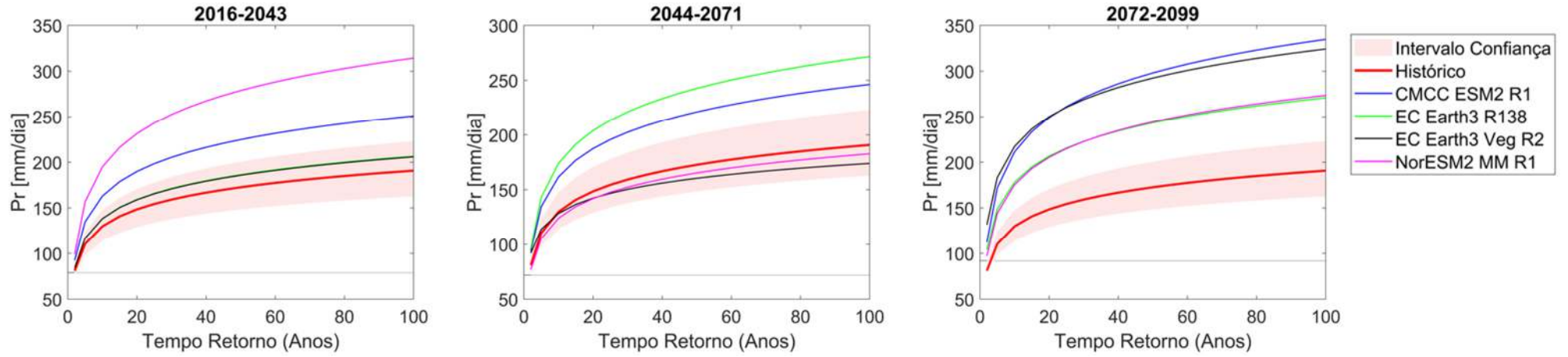
**Estação 01943022**



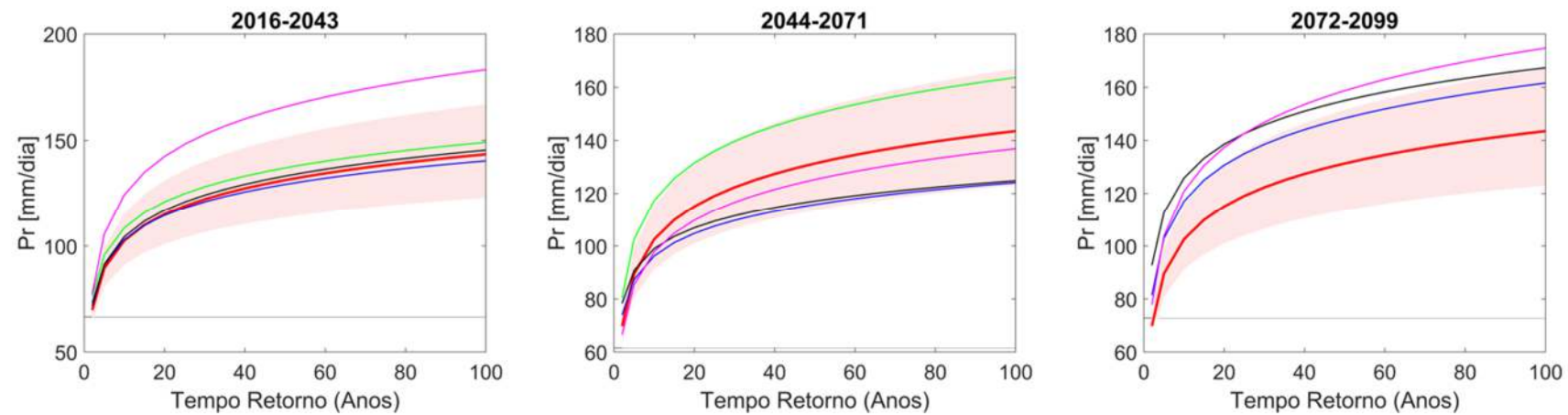
**Estação 01943024**



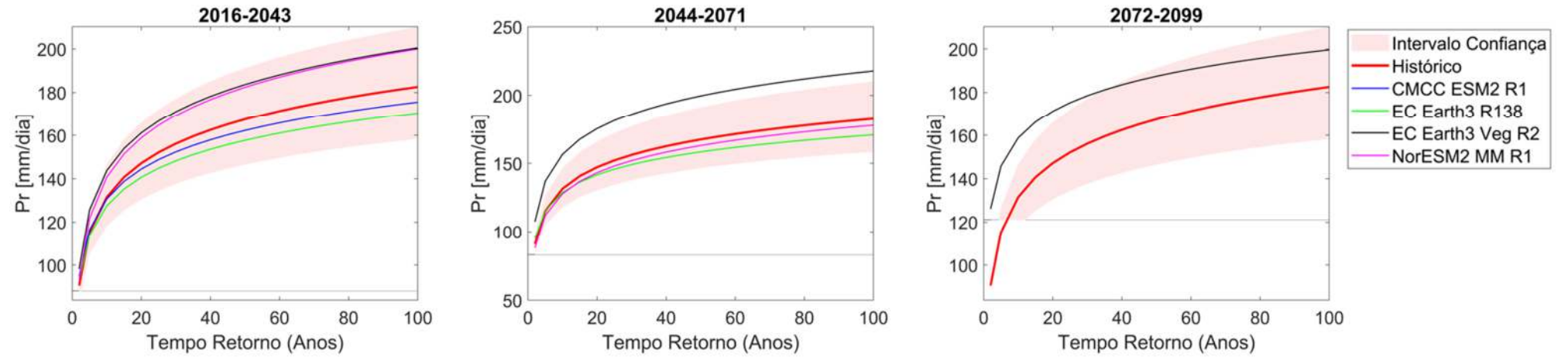
**Estação 01943042**



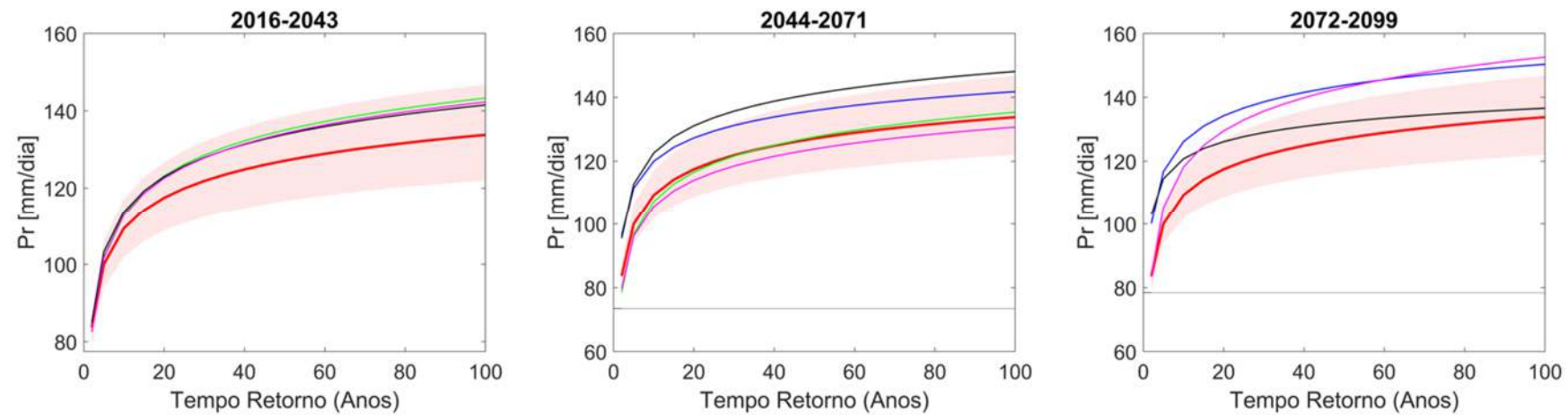
**Estação 01943049**



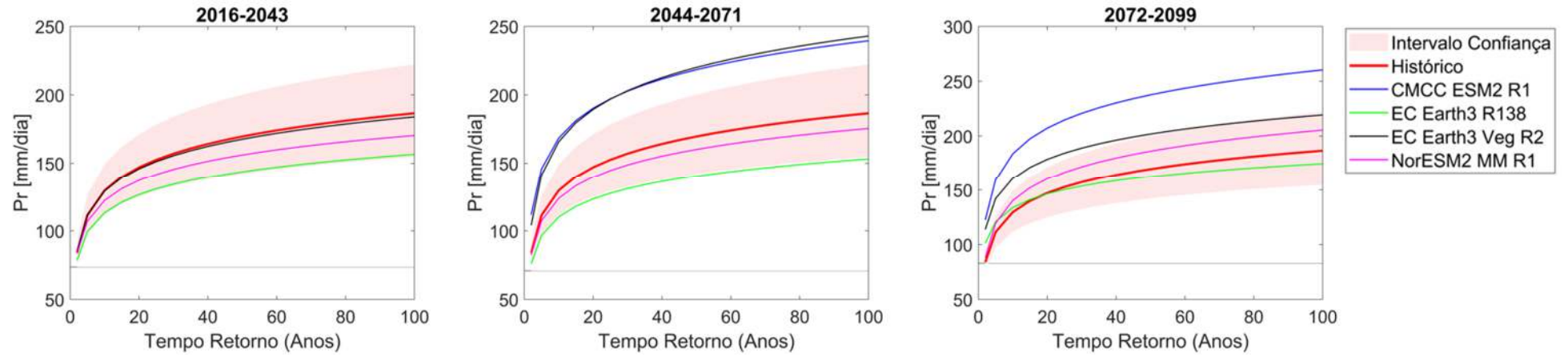
**Estação 01943055**



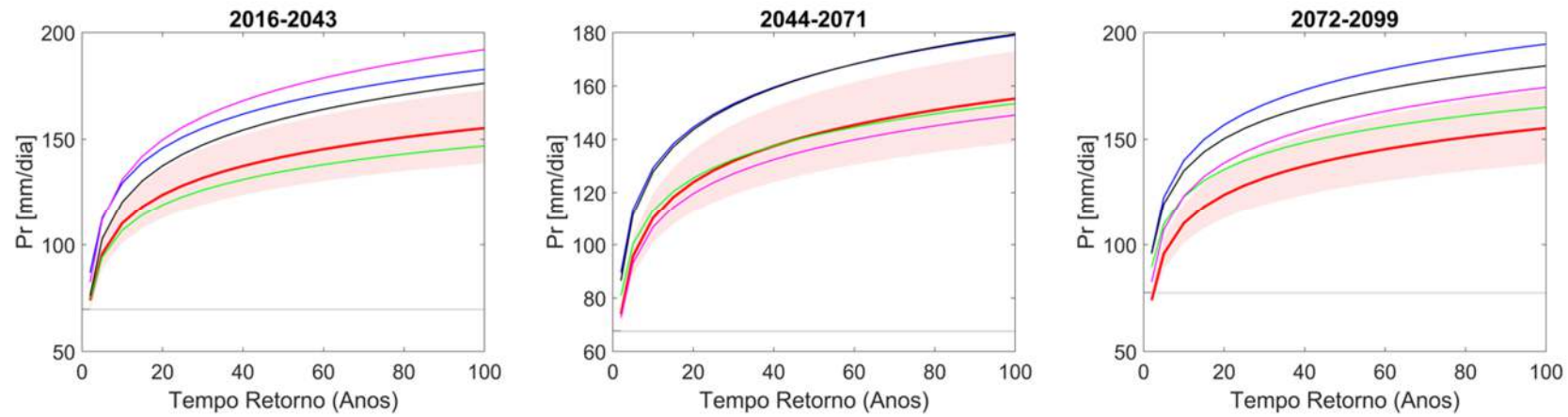
**Estação 01944004**



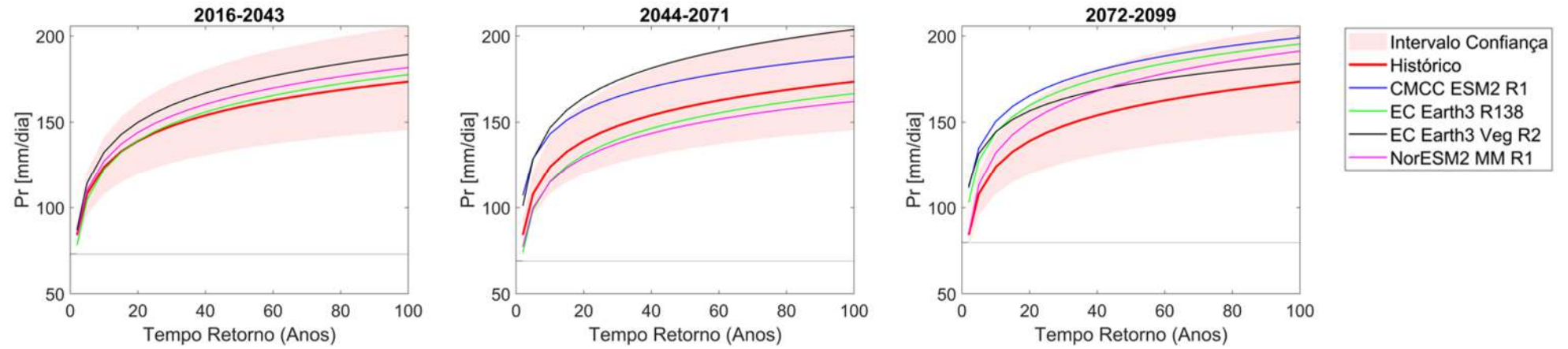
**Estação 01944007**



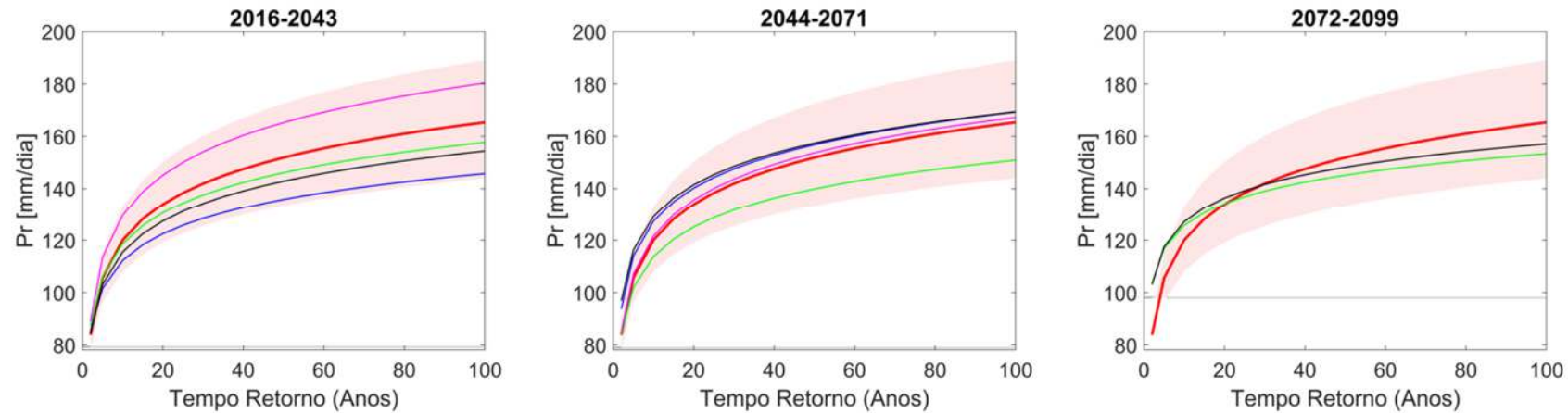
**Estação 01944009**



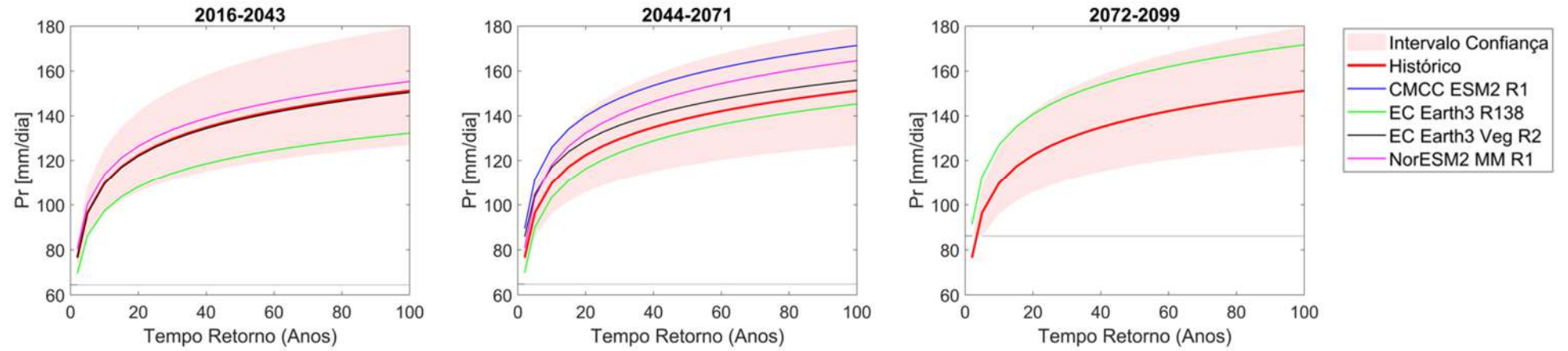
**Estação 01944026**



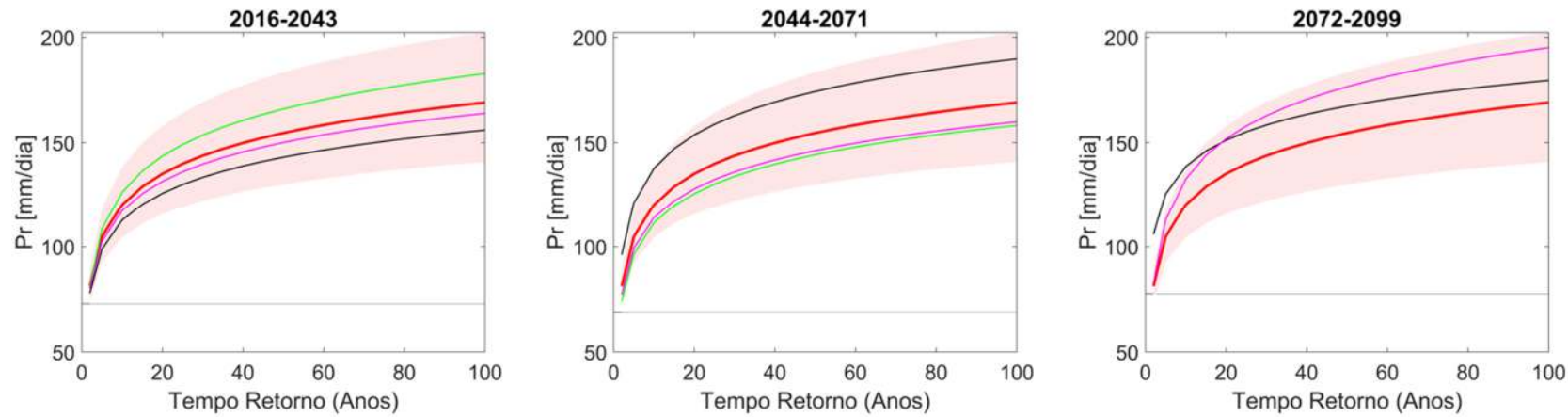
**Estação 01944027**



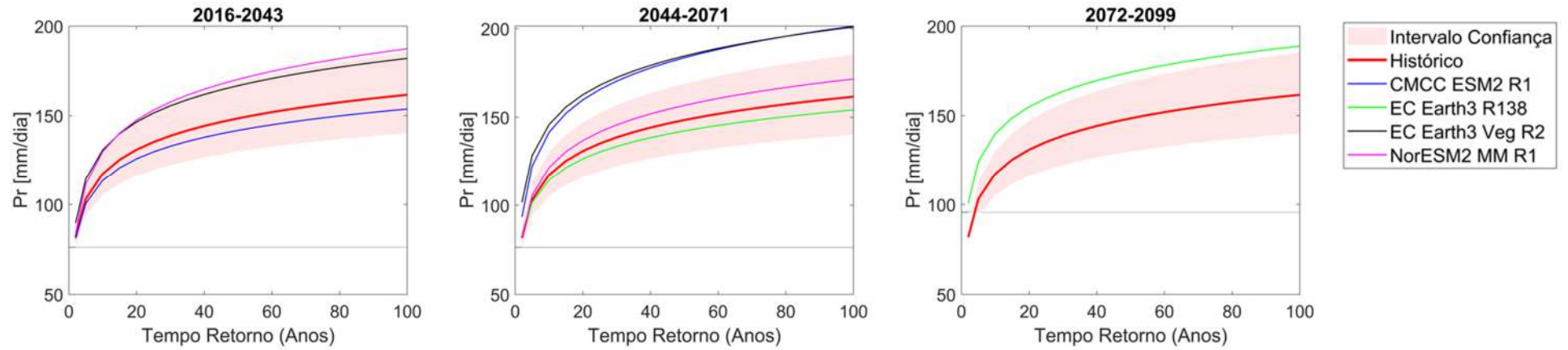
**Estação 01944055**



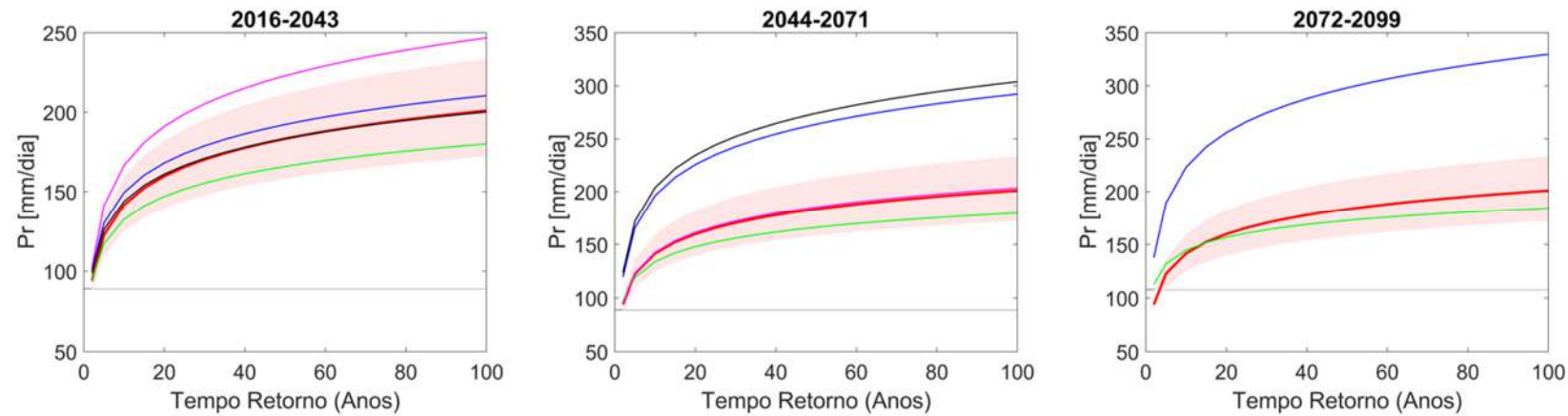
**Estação 01944062**



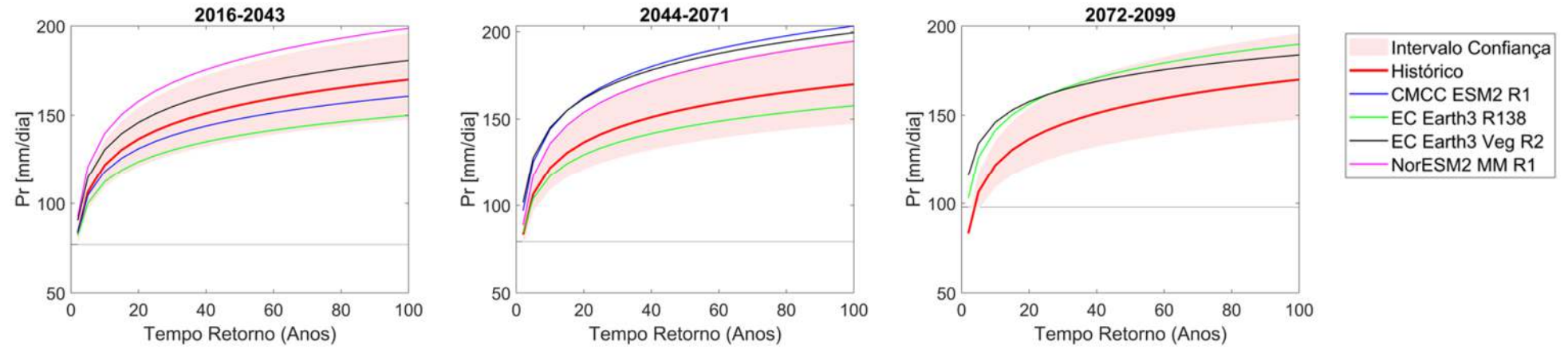
**Estação 02043002**



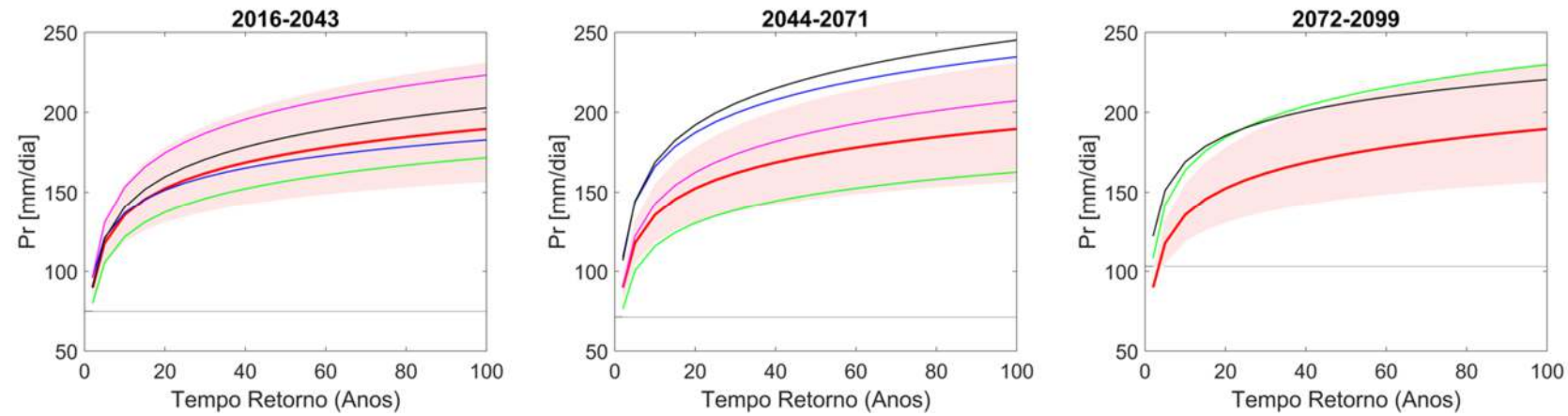
**Estação 02043004**



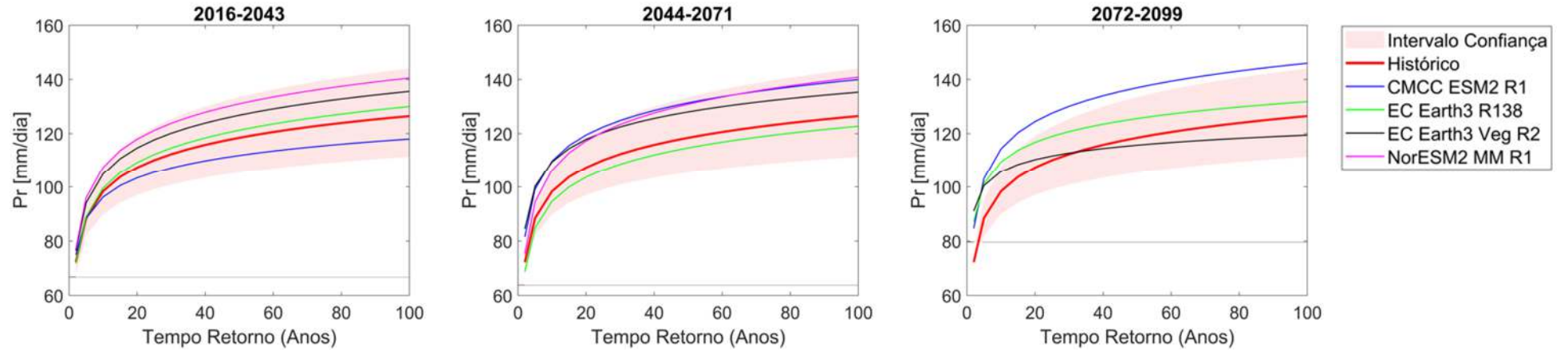
**Estação 02043042**



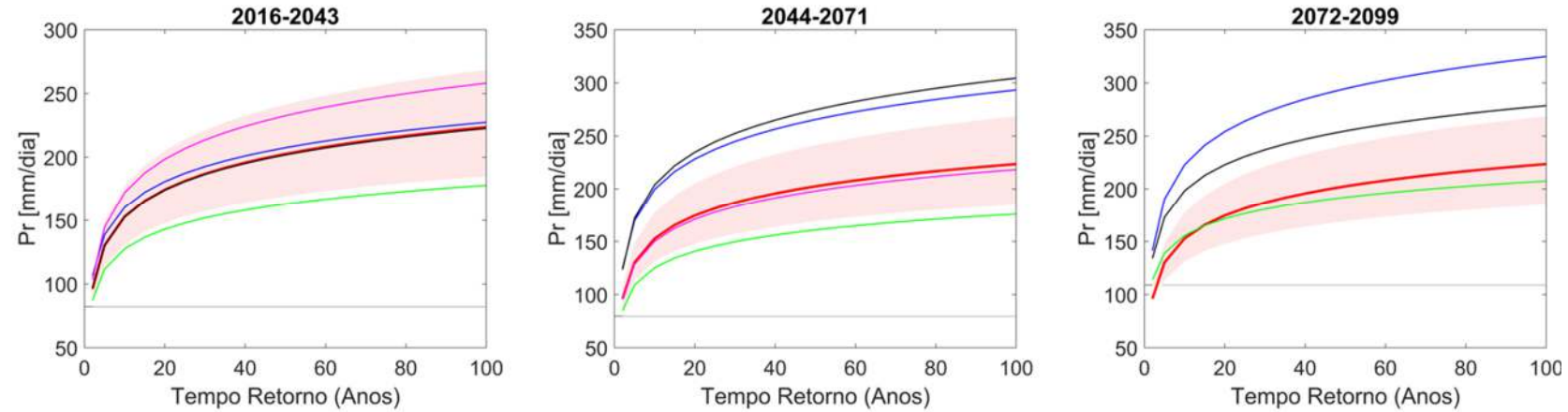
**Estação 02043043**



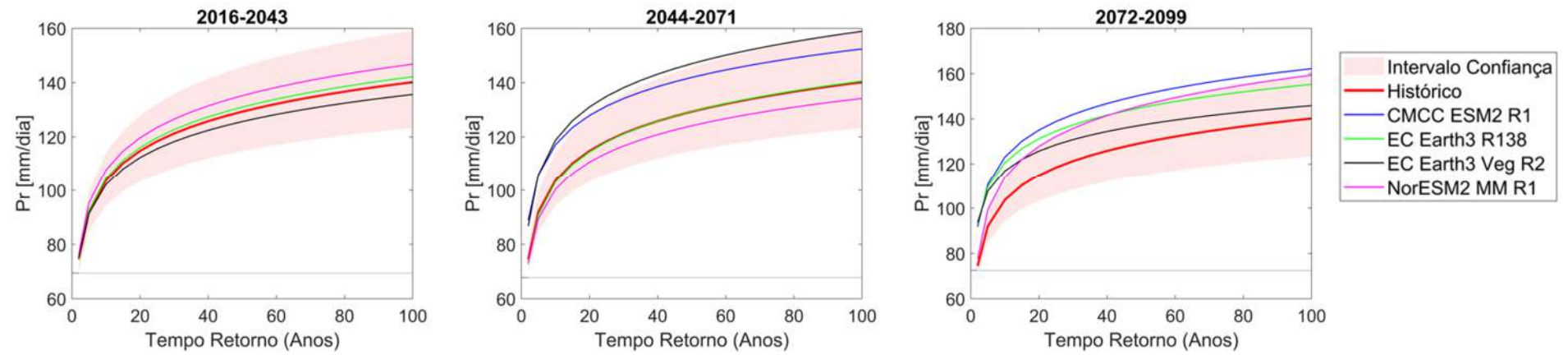
**Estação 02044008**



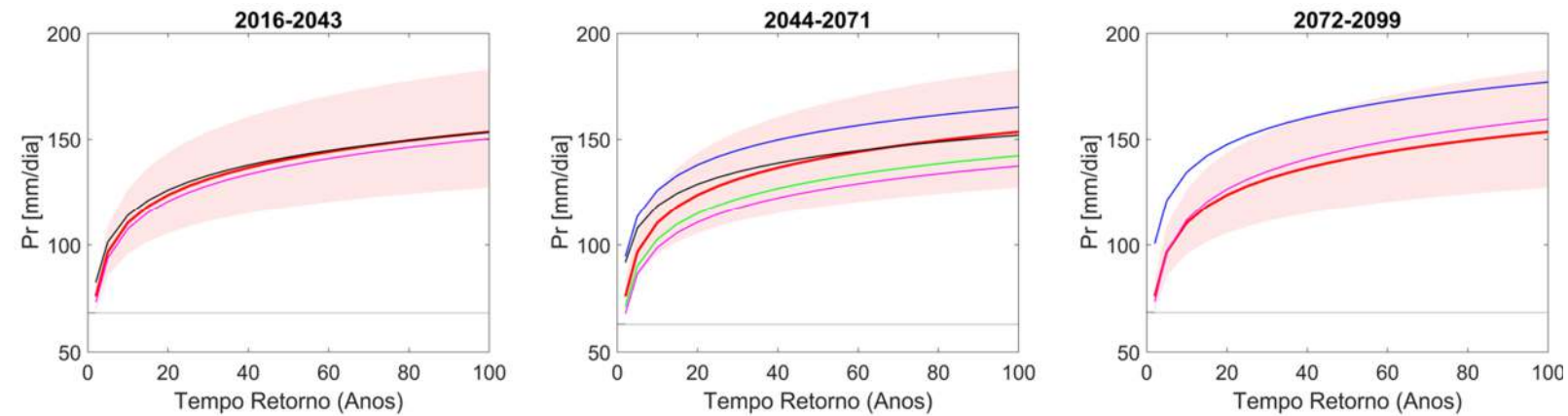
**Estação 02044012**



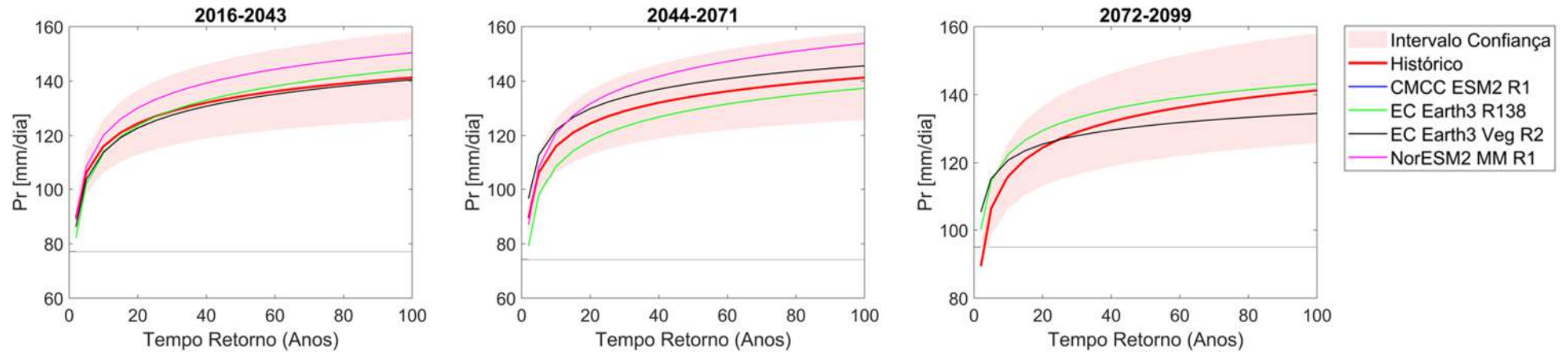
**Estação 02044016**



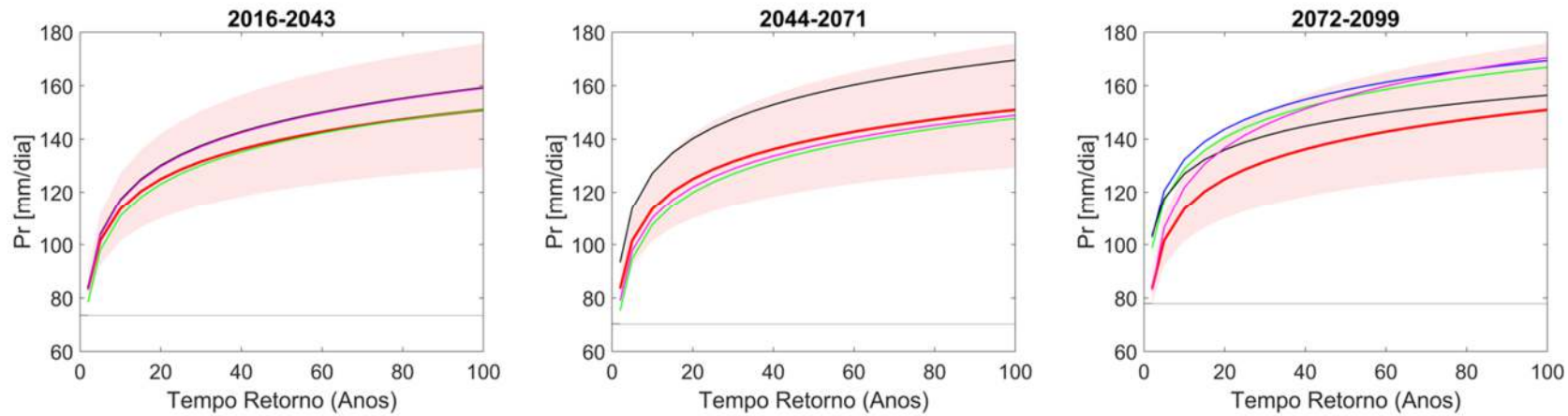
**Estação 02044020**



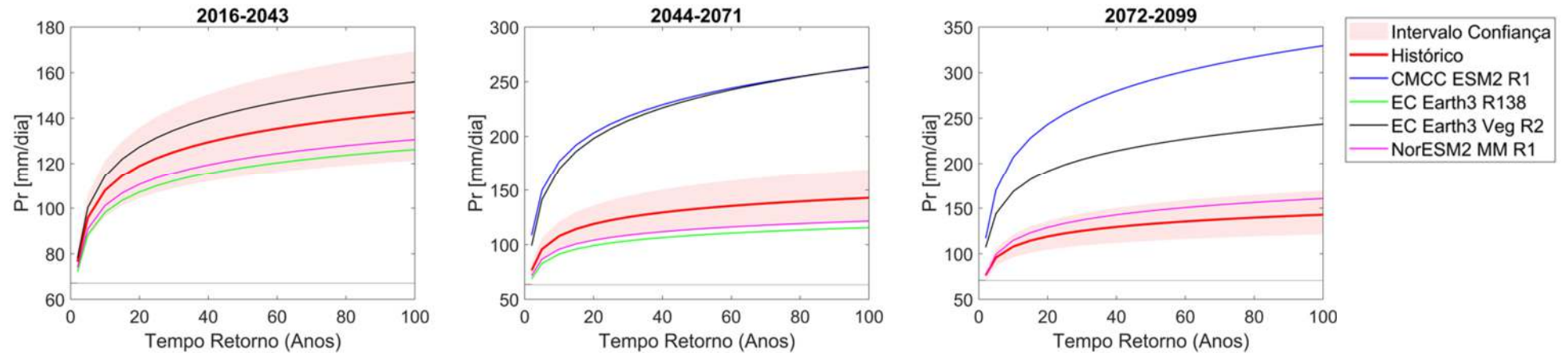
**Estação 02044024**



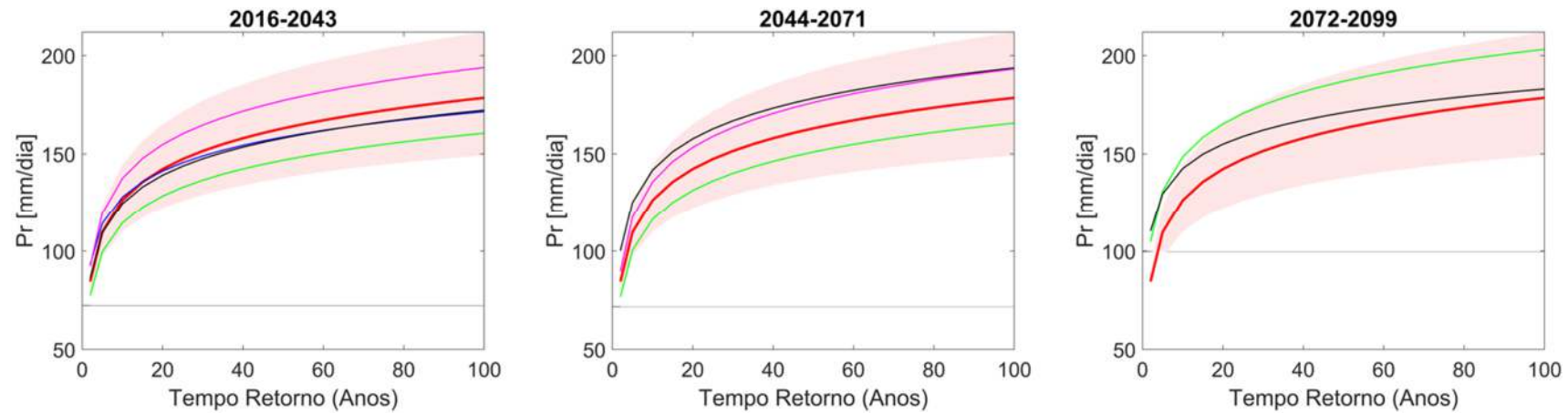
**Estação 02044043**



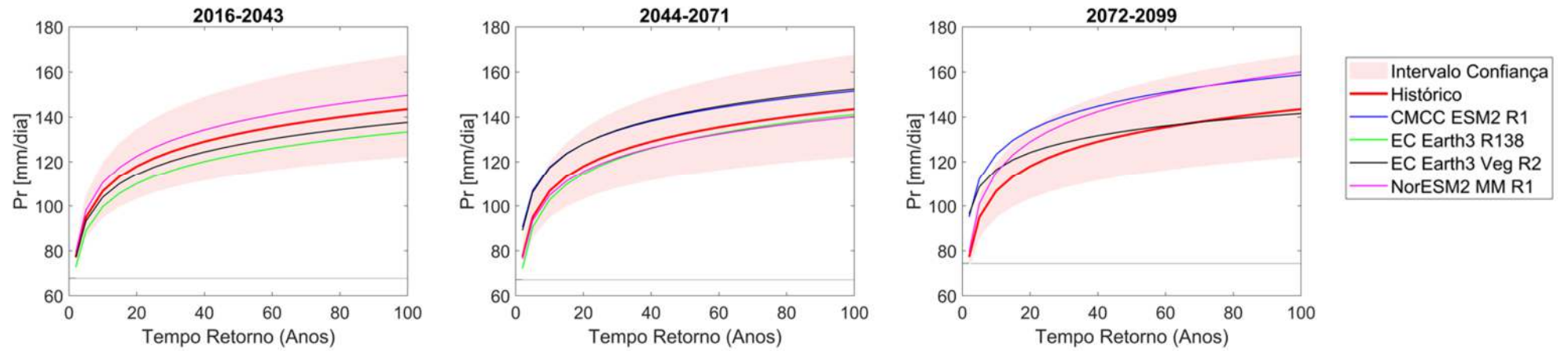
Estação 02044052



Estação 02044053



Estação 02044054



## APÊNDICE 7: ALTERAÇÕES MÁXIMAS E MÍNIMAS PROJETADAS EM CADA CENÁRIO DE EMISSÃO

| Cenário de emissão SSP1-2.6 |   |   |   |   |   |   |
|-----------------------------|---|---|---|---|---|---|
| TR                          | 2016-2043                                 |   | 2044-2071                                 |   | 2072-2099                                 |   |
|                             | Máximo incremento da intensidade (mm/dia) | Máxima Diminuição da intensidade (mm/dia) | Máximo incremento da intensidade (mm/dia) | Máxima Diminuição da intensidade (mm/dia) | Máximo incremento da intensidade (mm/dia) | Máxima Diminuição da intensidade (mm/dia) |
| 2                           | 11,07                                     | 8,74                                      | 7,76                                      | N/A                                       | 15,96                                     | 3,05                                      |
| 5                           | 11,30                                     | 12,02                                     | 9,93                                      | N/A                                       | 19,28                                     | 4,52                                      |
| 10                          | 11,92                                     | 14,41                                     | 13,63                                     | N/A                                       | 21,46                                     | 7,50                                      |
| 15                          | 12,07                                     | 15,75                                     | 15,13                                     | N/A                                       | 22,69                                     | 9,16                                      |
| 20                          | 13,41                                     | 16,70                                     | 16,19                                     | N/A                                       | 23,55                                     | 11,21                                     |
| 25                          | 13,60                                     | 17,42                                     | 17,75                                     | N/A                                       | 24,21                                     | 12,40                                     |
| 30                          | 13,76                                     | 18,01                                     | 18,49                                     | 5,42                                      | 24,75                                     | 13,38                                     |
| 35                          | 13,89                                     | 18,51                                     | 19,11                                     | 5,77                                      | 25,21                                     | 14,20                                     |
| 40                          | 14,72                                     | 18,94                                     | 19,65                                     | 6,07                                      | 25,60                                     | 14,91                                     |
| 45                          | 14,85                                     | 19,32                                     | 20,13                                     | 6,34                                      | 25,94                                     | 15,53                                     |
| 50                          | 14,97                                     | 19,66                                     | 20,55                                     | 6,58                                      | 26,25                                     | 16,09                                     |
| 55                          | 15,07                                     | 19,96                                     | 20,94                                     | 6,38                                      | 26,53                                     | 16,59                                     |
| 60                          | 15,16                                     | 20,24                                     | 21,29                                     | 6,58                                      | 26,79                                     | 17,05                                     |
| 65                          | 15,25                                     | 20,50                                     | 21,61                                     | 6,77                                      | 27,02                                     | 17,48                                     |
| 70                          | 15,33                                     | 20,74                                     | 21,91                                     | 6,94                                      | 27,24                                     | 17,87                                     |
| 75                          | 15,41                                     | 20,96                                     | 22,19                                     | 7,10                                      | 27,44                                     | 18,23                                     |
| 80                          | 15,48                                     | 21,16                                     | 22,45                                     | 7,25                                      | 27,62                                     | 18,58                                     |
| 85                          | 15,54                                     | 21,36                                     | 22,70                                     | 7,39                                      | 27,80                                     | 18,90                                     |
| 90                          | 15,60                                     | 21,54                                     | 22,93                                     | 7,52                                      | 27,97                                     | 19,20                                     |
| 95                          | 15,66                                     | 21,71                                     | 23,15                                     | 7,65                                      | 28,12                                     | 19,48                                     |
| 100                         | 16,55                                     | 21,88                                     | 23,36                                     | 7,77                                      | 28,27                                     | 19,75                                     |

N/A: Nestes tempos de retorno não se projetam diminuições das intensidades

| Cenário de emissão SSP5-8.5 |   |   |   |   |   |   |
|-----------------------------|---|---|---|---|---|---|
| TR                          | 2016-2043                                 |   | 2044-2071                                 |   | 2072-2099                                 |   |
|                             | Máximo incremento da intensidade (mm/dia) | Máxima Diminuição da intensidade (mm/dia) | Máximo incremento da intensidade (mm/dia) | Máxima Diminuição da intensidade (mm/dia) | Máximo incremento da intensidade (mm/dia) | Máxima Diminuição da intensidade (mm/dia) |
| 2                           | 6,72                                      | -4,12                                     | 16,10                                     | -7,41                                     | 28,08291581                               | N/A                                       |
| 5                           | 10,24                                     | -7,30                                     | 20,24                                     | -7,12                                     | 33,28390532                               | N/A                                       |
| 10                          | 13,49                                     | -8,24                                     | 22,67                                     | -8,01                                     | 38,91070737                               | N/A                                       |
| 15                          | 15,32                                     | -9,50                                     | 24,05                                     | -8,94                                     | 42,12279363                               | N/A                                       |
| 20                          | 16,60                                     | -10,97                                    | 26,21                                     | -9,59                                     | 44,38730301                               | N/A                                       |
| 25                          | 17,59                                     | -11,71                                    | 27,03                                     | -10,08                                    | 46,14021504                               | N/A                                       |
| 30                          | 18,39                                     | -13,06                                    | 29,05                                     | -10,49                                    | 47,57182081                               | N/A                                       |
| 35                          | 19,07                                     | -13,62                                    | 29,66                                     | -10,83                                    | 48,78255204                               | N/A                                       |
| 40                          | 19,66                                     | -14,11                                    | 30,20                                     | -11,64                                    | 49,83197645                               | N/A                                       |
| 45                          | 20,17                                     | -14,54                                    | 30,67                                     | -11,43                                    | 50,75835896                               | N/A                                       |
| 50                          | 20,63                                     | -14,92                                    | 31,09                                     | -11,70                                    | 51,58775451                               | N/A                                       |
| 55                          | 21,05                                     | -15,27                                    | 31,47                                     | -11,95                                    | 52,33871116                               | N/A                                       |
| 60                          | 21,43                                     | -15,58                                    | 31,82                                     | -12,17                                    | 53,02490756                               | N/A                                       |
| 65                          | 21,78                                     | -15,87                                    | 32,14                                     | -12,38                                    | 53,65671939                               | N/A                                       |
| 70                          | 22,10                                     | -16,14                                    | 32,43                                     | -12,57                                    | 54,24220812                               | N/A                                       |
| 75                          | 22,41                                     | -16,39                                    | 32,71                                     | -12,75                                    | 54,78776125                               | N/A                                       |
| 80                          | 22,69                                     | -16,62                                    | 32,97                                     | -12,91                                    | 55,29852664                               | N/A                                       |
| 85                          | 22,95                                     | -16,84                                    | 33,21                                     | -13,07                                    | 55,77871429                               | N/A                                       |
| 90                          | 23,20                                     | -17,05                                    | 33,44                                     | -13,22                                    | 56,23181143                               | N/A                                       |
| 95                          | 23,44                                     | -18,32                                    | 33,66                                     | -13,36                                    | 56,66073922                               | N/A                                       |
| 100                         | 23,66                                     | -18,53                                    | 33,86                                     | -13,49                                    | 57,06796916                               | N/A                                       |

N/A: Nestes tempos de retorno não se projetam diminuições das intensidades