

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS
E SANEAMENTO AMBIENTAL

DANIELE FEITOZA SILVA

CURVAS IDF NÃO-ESTACIONÁRIAS NA AVALIAÇÃO DO EFEITO DE
MUDANÇAS CLIMÁTICAS EM PRECIPITAÇÕES INTENSAS

PORTO ALEGRE

2022

DANIELE FEITOZA SILVA

CURVAS IDF NÃO-ESTACIONÁRIAS NA AVALIAÇÃO DO EFEITO DE
MUDANÇAS CLIMÁTICAS EM PRECIPITAÇÕES INTENSAS

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de doutora.

Orientador: Prof. Dr. Joel Avruch Goldenfum

Co-orientador: Prof. Dr. Fernando Dornelles

PORTO ALEGRE

2022

CIP - Catalogação na Publicação

Silva, Daniele Feitoza

Curvas IDF não-estacionárias na avaliação do efeito de mudanças climáticas em precipitações intensas / Daniele Feitoza Silva. -- 2022.

193 f.

Orientador: Joel Avruch Goldenfum.

Coorientador: Fernando Dornelles.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2022.

1. curvas IDF. 2. não-estacionariedade. 3. mudanças climáticas. 4. estratégias de adaptação. I. Goldenfum, Joel Avruch, orient. II. Dornelles, Fernando, coorient. III. Título.

DANIELE FEITOZA SILVA

CURVAS IDF NÃO-ESTACIONÁRIAS NA AVALIAÇÃO DO EFEITO DE
MUDANÇAS CLIMÁTICAS EM PRECIPITAÇÕES INTENSAS

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação
em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como
requisito parcial à obtenção do grau de doutora.

Aprovado em: Porto Alegre, 07 de abril de 2022.

Prof. Dr. Joel Avruch Goldenfum – IPH/UFRGS
Orientador

Prof. Dr. Fernando Dornelles – IPH/UFRGS
Co-Orientador

Prof. Dr. Walter Collischonn – IPH/UFRGS
Examinador

Prof. Dr. Alfonso Risso – IPH/UFRGS
Examinador

Prof. Dr. Vladimir Caramori Borges de Souza – CTEC/UFAL
Examinador

À minha avó Maria José Feitosa (*in memoriam*)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por sempre me dar força e coragem para enfrentar os desafios a mim apresentados.

Agradeço a minha mãe Maria, por sempre estar ao meu lado, apoiar minhas decisões e ser o alicerce da família. Agradeço a meu tio Gilvan, por estar sempre presente, aonde quer que eu vá. Agradeço ao meu pai Mário e minhas irmãs Débora e Dianna por, mesmo que distante, vibrarem com minhas conquistas. Agradeço a minha avó Zezé, por ter estado perto quando me mudei para Porto Alegre.

Agradeço ao meu amor e parceiro, Benício, por todos os momentos de alegria, aprendizado e conquistas compartilhados e palavras de conforto nos momentos de angústia durante essa jornada.

Agradeço aos meus orientadores Prof. Joel Goldenfum e Prof. Fernando Dornelles, pela confiança, conversas e ajuda no processo de construção e desenvolvimento deste trabalho. Agradeço também ao Prof. Slobodan Simonovic, pelo acolhimento, convívio, aprendizado e orientação durante o Sanduíche, e inclusive além dele.

Agradeço aos professores Rodrigo Paiva e Anderson Ruhoff pelas conversas construtivas e discussões acerca do tema.

Agradeço à minha família alagoana em Porto Alegre, Thiago, Hugo, Sly, João, Cleber, Mateus, Sofia e Gláucia, pelo carinho e atenção de sempre.

Agradeço às amigas da Sala Tubarão/SãoLeo Fran V., Juliana, Fran Z. e Camila, pela convivência, parceria e amizade. Vocês moram no meu coração.

Agradeço aos amigos que conquistei durante os anos no IPH, Ayan, Karla, Débora, Gean, Juan, Dani, Adriana, Regina, Diego, Paixão e Itza. Vocês fizeram os dias mais calmos e divertidos.

Agradeço à família POA-Maceió, Rafael, Víctor, Tamara, Vivian, Marcus, Marlos, Luana e Lívia, pelos momentos felizes e de descontração.

Agradeço aos amigos que sempre incentivaram minha carreira e se mantiveram próximos durante esta caminhada, Roberta, Thiago, Ísis, Renata, Camila e Thaíse.

Agradeço aos amigos de Pariconha por todas as alegrias, mesmo à distância, Priscila, Nadjane, Bel, Ricardo, Leonardo, Jeferson e Tauanny; e aos amigos que vieram alegrar os meus dias, Myrian, Paulo, Elton, Diego, Jociane e Monique.

Agradeço aos meus tios Gildete e Miguel, por sempre torcerem pelo meu sucesso, e aos meus primos Bel, Laís, Larissa e Lucas.

Agradeço à minha família no Canadá Josi, Fernando, Bryan, Sônia e Edinara, por cuidarem tão bem de mim durante o intercâmbio.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoa de Nível Superior (CAPES) pelo fomento as duas bolsas de pesquisa que me foram concedidas.

Por fim, agradeço ao IPH por ter sido uma segunda casa e ter dado todo o suporte necessário ao desenvolvimento da minha pesquisa, e a Western Ontario pelo acolhimento durante o intercâmbio.

“It is not the strongest of the species that survives, nor the most intelligent that survives. It is the one that is the most adaptable to change”.

Charles Darwin

RESUMO

Curvas Intensidade-duração-frequência (IDF) são relações hidrológicas amplamente utilizadas em projetos de infraestrutura hídrica e planejamento de bacias hidrográficas. Entretanto, é comum que IDFs sejam produzidas sob uma abordagem estacionária, o que pode não ser legítimo, nem no período histórico nem no futuro, dados os efeitos de mudanças nos padrões de precipitação. Estudos anteriores indicaram um aumento na magnitude e frequência de eventos extremos de precipitação em decorrência das mudanças climáticas. Sendo assim, espera-se um aumento do risco hidrológico associado a esses eventos e respectiva redução do tempo de retorno. Tais possibilidades alertam para a importância do conhecimento, da técnica e da adequada quantificação das curvas IDF no período futuro, essa podendo ser considerada como medida adaptativa às mudanças do clima. Neste sentido, este trabalho introduz uma abordagem não-estacionária na geração de curvas IDF futuras – em adição à abordagem estacionária – baseando-se no método *Equidistance Quantile Matching* (EQM). Utilizou-se para este fim, projeções do comportamento climático provenientes do modelo regional Eta (INPE-CPTEC), explorando-se a resolução temporal de 3-h e Diária, e os cenários de emissão de gases de efeito estufa do IPCC (RCP 4.5 e RCP 8.5). As IDFs futuras foram produzidas com base em duas séries de precipitação proveniente de estações meteorológicas, localizadas em duas áreas densamente urbanas do Brasil, Porto Alegre e São Paulo, para o horizonte de projeto de 2099. Esses locais foram definidos devido ao período de dados disponíveis (>30 anos), diferentes condições climáticas, e por serem municípios altamente urbanizados. Análises aos modelos climáticos utilizados identificaram moderado desempenho em representar os eventos extremos. A partir da metodologia aplicada, foi possível quantificar os impactos das mudanças climáticas sobre as precipitações intensas. Para Porto Alegre, as análises indicaram que um aumento das precipitações intensas está intrínseco aos efeitos de mudanças do clima, pois no período histórico não foram identificadas modificações significativas associadas. Já para São Paulo observou-se um comportamento contrário a Porto Alegre, sendo identificada subestimativa nas relações IDF históricas por abordagem estacionária, que ao serem adotadas mascaram os efeitos da mudança do clima no futuro, decorrentes dos cenários globais, e alteram a direção da mudança para algumas durações de precipitação. Para o cenário climático RCP 8.5, os resultados da abordagem não-estacionária indicam que eventos de precipitação de duração 24 horas e tempo de retorno 100 anos, no período histórico, tendem a ocorrer com mais frequência até o fim do século XXI (2099), reduzindo o tempo de retorno para 25 anos, em São Paulo, e para 50 anos, em Porto Alegre. Ainda, a metodologia aqui aplicada poderá servir de modelo quando da atualização/adaptação de curvas IDF como estratégia de adaptação na proposição de Planos Diretores de Drenagem Urbana, Planejamento Territorial e Gestão de Desastres de natureza hidrológica.

Palavras-chave: curvas IDF; não-estacionariedade; mudanças climáticas; estratégias de adaptação.

Assessment of climate change on intense precipitation based on non-stationary rainfall

ABSTRACT

Intensity-duration-frequency (IDF) curves unify intense precipitation characteristics and are widely used in water infrastructure design and management. However, IDF are usually estimated under a stationary approach, which may not be realistic, neither in the historical nor in the future period, because of the impacts of climate change. Previous studies already observed an increase of rainfall depth and frequency of extreme events, as a consequence of global warming. Indeed, it is expected an increase of the hydrological risk associated to these events, meanwhile the corresponding return period reduces. Those possibilities give a sign to the importance to knowledge, capability, and suitable estimation of future IDF curves, being able to be considered as a climate adaptation measure. This work introduces a non-stationary approach – in addition to stationary – in generating future IDF curves, based on the Equidistance Quantile Matching method (EQM). Climate projections from the regional climate model Eta (INPE/CPTEC), 3-h and Daily resolution temporal, and the greenhouse's emission scenarios RCP 4.5 and RCP 8.5 from IPCC were used. Future IDFs were generated based on the series of precipitation for two gauging stations, both located in densely urban areas, Porto Alegre and São Paulo, Brazil, considering the project horizon as 2099. Those locations were selected based on the availability and representativeness of precipitation data, and different climate zones. The assessment of the climate models indicated a moderate performance in representing extreme precipitation. Based on the methodology, it was able to estimate the impacts of climate change on extreme precipitation. For Porto Alegre, analysis indicated that an increase of precipitation is only inherent to climate change (in the form of RCPs), since there is no change associated to precipitation data in the historical period. Otherwise, São Paulo presented a different behavior, being identified an underestimation of historical IDF curves under the stationary approach, which are able to mask the power and direction of climate change in the future. To the RCP 8.5 scenario, results indicated that the 24 h and 100 years return period events tends to occur more frequently by the the of the century, reducing the return period to 25 years in São Paulo, and 50 years to Porto Alegre. Moreover, the methodology applied may encourage the demand for updating of IDF curves as a climate change adaptation measure to Drainage Master plans, Land management and Disaster management.

Keywords: IDF curves; non-stationarity; climate change; climate adaptation measures.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3-1. Exemplo de curva IDF para o posto meteorológico 8º DISME, Porto Alegre, RS, Brasil. Fonte: HELFER; DORNELLES; GOLDENFUM (2017).	8
Figura 3-2. Esquematização do comportamento estacionário (acima) e não-estacionário (abaixo), em relação a probabilidade de excedência (p) e não-excedência(q). Fonte: SALAS; OBEYESEKERA (2014).	12
Figura 3-3. Representação de redução de escala para modelos climáticos em bacias pequenas. Fonte: WILLEMS (2010).	18
Figura 3-4. Variação da temperatura global para diferentes RCPs e incertezas. Fonte: adaptado de KNUTTI; SEDLACEK (2013).	20
Figura 4-1. Porção da população em áreas urbanas, por região do Brasil. Fonte: IBGE (2010).	26
Figura 4-2. Projeção futura da porcentagem da população urbana no Brasil. Fonte: Organização das Nações Unidas (2022).	26
Figura 5-1. Fluxograma metodológico.	37
Figura 5-2. Localização da Estação Meteorológica 8º DISME, Porto Alegre – RS. ...	39
Figura 5-3. Localização da Estação Meteorológica IAG USP, São Paulo – SP.	41
Figura 5-4. Fluxograma da metodologia de adaptação de curvas IDF sob o efeito de mudanças climáticas. Fonte: SCHARDONG <i>et al.</i> (2018).	50
Figura 5-5. Fluxograma da metodologia de adaptação de curvas IDF sob o efeito de mudanças climáticas, considerando não-estacionariedade. Fonte: SILVA <i>et al.</i> (2021b).	52
Figura 5-6. Representação do gráfico do tipo <i>boxplot</i>	53
Figura 6-1. Curvas IDF (estacionária) para a estação 8º DISME – Porto Alegre, no período histórico, para diferentes tempos de retorno.	64
Figura 6-2. Curvas IDF para a estação IAG/USP– São Paulo no período histórico. Curvas contínuas são curvas estacionárias, e curvas tracejadas são não-estacionárias, para diferentes tempos de retorno.	67
Figura 6-3. Pontuação de Taylor para séries simuladas com viés corrigido – estação Porto Alegre.	71
Figura 6-4. Pontuação de Taylor para séries simuladas com viés corrigido – estação São Paulo.	72
Figura 6-5. Expectativas do comportamento da intensidade de precipitação para os diferentes cenários, para a estação Porto Alegre.	74

Figura 6-6. Expectativas do comportamento da intensidade de precipitação para os diferentes cenários, para a estação São Paulo.	74
Figura 6-7. Curvas IDF futuras para estação de Porto Alegre para os tempos de retorno de 10 e 100 anos. As linhas contínuas se referem à adoção do método estacionário (EQM), enquanto as linhas tracejadas se referem à adoção do método não-estacionário (EQM _{NS}).	77
Figura 6-8. Curvas IDF futuras para estação de São Paulo. As linhas contínuas se referem à adoção do método estacionário (EQM), enquanto as linhas tracejadas se referem à adoção do método não-estacionário (EQM _{NS}), para diferentes tempos de retorno.	79
Figura 6-9. Mudança relativa, em porcentagem, da intensidade de precipitação para diferentes tempos de retorno utilizando o método EQM, para estação de Porto Alegre.	82
Figura 6-10. Mudança relativa, em porcentagem, da intensidade de precipitação para diferentes tempos de retorno utilizando o método EQM _{NS} , para estação de Porto Alegre.	83
Figura 6-11. Mudança relativa, em porcentagem, da intensidade de precipitação para diferentes tempos de retorno utilizando o método estacionário EQM, para estação de São Paulo.	85
Figura 6-12. Mudança relativa, em porcentagem, da intensidade de precipitação para diferentes tempos de retorno utilizando o método não-estacionário EQM _{NS} , para estação de São Paulo.	86
Figura 6-13. Variação da intensidade de precipitação futura para a estação de Porto Alegre e tempo de retorno de 2 anos e 100 anos, adotando abordagem não-estacionária: a) RCP 4.5 e b) RCP 8.5.	88
Figura 6-14. Intervalos de confiança de 95% para a estimativa de precipitação de duração 1 h e diferentes tempos de retorno (Porto Alegre).	92
Figura 6-15. Intervalos de confiança de 95% para a estimativa de precipitação de duração 24 h e diferentes tempos de retorno (Porto Alegre).	93
Figura 6-16. Intervalos de confiança de 95% para a estimativa de precipitação de duração 1 h e diferentes tempos de retorno (São Paulo).	94
Figura 6-17. Intervalos de confiança de 95% para a estimativa de precipitação de duração 24 h e diferentes tempos de retorno (São Paulo).	95
Figura A-1. Gráficos quantil-quantil para as séries máximas históricas para estação Porto Alegre, utilizando GEV-I.	125
Figura A-2. Gráficos quantil-quantil para as séries máximas históricas para estação São Paulo, utilizando GEV-III.	126

Figura A-3. <i>Boxplots</i> das intensidades de precipitação para estação Porto Alegre para diferentes tempos de retorno – RCP 4.5 (3-horas).....	131
Figura A-4. <i>Boxplots</i> das intensidades de precipitação para estação Porto Alegre para diferentes tempos de retorno – RCP 4.5 (Diária).	132
Figura A-5. <i>Boxplots</i> das intensidades de precipitação para estação Porto Alegre para diferentes tempos de retorno – RCP 8.5 (3-horas).....	133
Figura A-6. <i>Boxplots</i> das intensidades de precipitação para estação Porto Alegre para diferentes tempos de retorno – RCP 8.5 (Diária).	134
Figura A-7. <i>Boxplots</i> das intensidades de precipitação para estação São Paulo para diferentes tempos de retorno - RCP 4.5 (3-horas).	135
Figura A-8. <i>Boxplots</i> das intensidades de precipitação para estação São Paulo para diferentes tempos de retorno – RCP 4.5 (Diária).	136
Figura A-9. <i>Boxplots</i> das intensidades de precipitação para estação São Paulo para diferentes tempos de retorno – RCP 8.5 (3-horas).....	137
Figura A-10. <i>Boxplots</i> das intensidades de precipitação para estação São Paulo para diferentes tempos de retorno – RCP 8.5 (Diária).	138
Figura A-11. Gráficos quantil-quantil ajustados às séries futuras para estação Porto Alegre (RCP 4.5 3-horas).....	152
Figura A-12. Gráficos quantil-quantil ajustados às séries futuras para estação Porto Alegre (RCP 4.5 Diária).....	153
Figura A-13. Gráficos quantil-quantil ajustados às séries futuras para estação Porto Alegre (RCP 8.5 3-horas).....	154
Figura A-14. Gráficos quantil-quantil ajustados às séries futuras para estação Porto Alegre (RCP 8.5 Diária).....	155
Figura A-15. Gráficos quantil-quantil ajustados às séries futuras para estação São Paulo (RCP 4.5 3-horas).....	156
Figura A-16. Gráficos quantil-quantil ajustados às séries futuras para estação São Paulo (RCP 4.5 Diária).....	157
Figura A-17. Gráficos quantil-quantil ajustados às séries futuras para estação São Paulo (RCP 8.5 3-horas).....	158
Figura A-18. Gráficos quantil-quantil ajustados às séries futuras para estação São Paulo (RCP 8.5 Diária).....	159

LISTA DE TABELAS

Tabela 3-1. Lista de modelos GCM que fazem parte do CMIP5 usuais na avaliação de impacto das mudanças climáticas. Fonte: Silva <i>et al.</i> (2021b).	16
Tabela 4-1. Resumo dos desafios identificados para alcançar adaptação climática em drenagem urbana no Brasil.....	30
Tabela 5-1. Resumo dos produtos climáticos utilizados para geração de IDF's adaptadas.....	42
Tabela 5-2. Lista de modelos de probabilidade de GEV ajustados aos dados.	43
Tabela 6-1. Valores de Δi , para séries históricas da estação Porto Alegre.	61
Tabela 6-2. Significância estatística (p-valor) comparando os diferentes modelos de GEV, para dados históricos da estação Porto Alegre.....	61
Tabela 6-3. Coeficiente de determinação do melhor modelo de GEV (modelo estacionário – GEV-I) para séries históricas da estação Porto Alegre.	61
Tabela 6-4. Valores de Δi , para séries históricas da estação São Paulo.	63
Tabela 6-5. Significância estatística (p-valor) comparando os diferentes modelos de GEV, para dados históricos da estação São Paulo.	63
Tabela 6-6. Coeficiente de determinação do melhor modelo de GEV para séries históricas da estação São Paulo.....	63
Tabela 6-7. Parâmetros da equação IDF para Porto Alegre, período histórico.	65
Tabela 6-8. Intensidade de precipitação, em mm/h, para as diferentes curvas IDF disponíveis em Porto Alegre, no período histórico.....	65
Tabela 6-9. Parâmetros das equações IDF para São Paulo, período histórico.	67
Tabela 6-10. Parâmetros das equações IDF para Porto Alegre, período futuro (2099), utilizando EQM.	78
Tabela 6-11. Parâmetros das equações IDF para Porto Alegre, período futuro (2099), utilizando EQM _{NS}	78
Tabela 6-12. Parâmetros das equações IDF para São Paulo, período futuro (2099), utilizando EQM.	80
Tabela 6-13. Parâmetros das equações IDF para São Paulo, período futuro (2099), utilizando EQM _{NS}	80
Tabela 6-14. Tempos de retorno no futuro (ano 2099) associado a intensidade de eventos no período histórico para a estação de Porto Alegre.	89

Tabela 6-15. Tempos de retorno no futuro (ano 2099) associado a intensidade de eventos no período histórico para a estação de São Paulo (IDF histórica estacionária).	90
Tabela A-1. Valores de CIA para os diferentes modelos de GEV em séries históricas da estação Porto Alegre.	123
Tabela A-2. Valores de CIA para os diferentes modelos de GEV em séries históricas da estação São Paulo.	123
Tabela A-3. Valores de CIAc para os diferentes modelos de GEV em séries históricas da estação Porto Alegre.	124
Tabela A-4. Valores de CIAc para os diferentes modelos de GEV em séries históricas da estação São Paulo.	124
Tabela A-5. Parâmetros de ajuste do melhor modelo de GEV, para a estação Porto Alegre, utilizando GEV-I.	127
Tabela A-6. Parâmetros de ajuste do melhor modelo de GEV, para a estação São Paulo, utilizando GEV-III.	127
Tabela A-7. Intensidade máxima de precipitação para a estação Porto Alegre, em mm/h, para os diferentes tempos de retorno.	128
Tabela A-8. Intensidade máxima de precipitação para a estação São Paulo no período histórico, em mm/h, para os diferentes tempos de retorno.	129
Tabela A-9. Valores de CIA para os diferentes modelos de GEV em séries futuras para a estação Porto Alegre (RCP 4.5 3-horas).	139
Tabela A-10. Valores de CIA para os diferentes modelos de GEV em séries futuras para a estação Porto Alegre (RCP 4.5 Diária).	139
Tabela A-11. Valores de CIA para os diferentes modelos de GEV em séries futuras para a estação Porto Alegre (RCP 8.5 3-horas).	140
Tabela A-12. Valores de CIA para os diferentes modelos de GEV em séries futuras para a estação Porto Alegre (RCP 8.5 Diária).	140
Tabela A-13. Valores de CIA para os diferentes modelos de GEV em séries futuras para a estação São Paulo (RCP 4.5 3-horas).	140
Tabela A-14. Valores de CIA para os diferentes modelos de GEV em séries futuras para a estação São Paulo (RCP 4.5 Diária).	141
Tabela A-13. Valores de CIA para os diferentes modelos de GEV em séries futuras para a estação São Paulo (RCP 8.5 3-horas).	141
Tabela A-16. Valores de CIA para os diferentes modelos de GEV em séries futuras para a estação São Paulo (RCP 8.5 Diária).	141

Tabela A-17. Valores de CIAC para os diferentes modelos de GEV em séries futuras para a estação Porto Alegre (RCP 4.5 3-horas).	142
Tabela A-18. Valores de CIAC para os diferentes modelos de GEV em séries futuras para a estação Porto Alegre (RCP 4.5 Diária).	142
Tabela A-19. Valores de CIAC para os diferentes modelos de GEV em séries futuras para a estação Porto Alegre (RCP 8.5 3-horas).	142
Tabela A-20. Valores de CIAC para os diferentes modelos de GEV em séries futuras para a estação Porto Alegre (RCP 8.5 Diária).	143
Tabela A-21. Valores de CIAC para os diferentes modelos de GEV em séries futuras para a estação São Paulo (RCP 4.5 3-horas).....	143
Tabela A-22. Valores de CIAC para os diferentes modelos de GEV em séries futuras para a estação São Paulo (RCP 4.5 Diária).	143
Tabela A-23. Valores de CIAC para os diferentes modelos de GEV em séries futuras para a estação São Paulo (RCP 8.5 3-horas).....	143
Tabela A-24. Valores de CIAC para os diferentes modelos de GEV em séries futuras para a estação São Paulo (RCP 8.5 Diária).	144
Tabela A-25. Valores de Δi para os diferentes modelos de GEV em séries futuras para a estação Porto Alegre (RCP 4.5 3-horas).	144
Tabela A-26. Valores de Δi para os diferentes modelos de GEV em séries futuras para a estação Porto Alegre (RCP 4.5 Diária).	144
Tabela A-27. Valores de Δi para os diferentes modelos de GEV em séries futuras para a estação Porto Alegre (RCP 8.5 3-horas).	145
Tabela A-28. Valores de Δi para os diferentes modelos de GEV em séries futuras para a estação Porto Alegre (RCP 8.5 Diária).	145
Tabela A-29. Valores de Δi para os diferentes modelos de GEV em séries futuras para a estação São Paulo (RCP 4.5 3-horas).....	145
Tabela A-30. Valores de Δi para os diferentes modelos de GEV em séries futuras para a estação São Paulo (RCP 4.5 Diária).....	146
Tabela A-31. Valores de Δi para os diferentes modelos de GEV em séries futuras para a estação São Paulo (RCP 8.5 3-horas).....	146
Tabela A-32. Valores de Δi para os diferentes modelos de GEV em séries futuras para a estação São Paulo (RCP 8.5 Diária).....	146
Tabela A-33. Significância estatística (p-valor) comparando os diferentes modelos de GEV, para séries futuras da estação Porto Alegre (RCP 4.5 3-horas).	147

Tabela A-34. Significância estatística (p-valor) comparando os diferentes modelos de GEV, para séries futuras da estação Porto Alegre (RCP 4.5 Diária).....	147
Tabela A-35. Significância estatística (p-valor) comparando os diferentes modelos de GEV, para séries futuras da estação Porto Alegre (RCP 8.5 3-horas).....	147
Tabela A-36. Significância estatística (p-valor) comparando os diferentes modelos de GEV, para séries futuras da estação Porto Alegre (RCP 8.5 Diária).....	148
Tabela A-37. Significância estatística (p-valor) comparando os diferentes modelos de GEV, para séries futuras da estação São Paulo (RCP 4.5 3-horas).	148
Tabela A-38. Significância estatística (p-valor) comparando os diferentes modelos de GEV, para séries futuras da estação São Paulo (RCP 4.5 Diária).	148
Tabela A-39. Significância estatística (p-valor) comparando os diferentes modelos de GEV, para séries futuras da estação São Paulo (RCP 8.5 3-horas).	148
Tabela A-40. Significância estatística (p-valor) comparando os diferentes modelos de GEV, para séries futuras da estação São Paulo (RCP 8.5 Diária).	149
Tabela A-41. Coeficiente de determinação do melhor modelo de GEV para séries futuras da estação Porto Alegre (RCP 4.5 3-horas).....	149
Tabela A-42. Coeficiente de determinação do melhor modelo de GEV para séries futuras da estação Porto Alegre (RCP 4.5 Diária).....	149
Tabela A-43. Coeficiente de determinação do melhor modelo de GEV para séries futuras da estação Porto Alegre (RCP 8.5 3-horas).....	150
Tabela A-44. Coeficiente de determinação do melhor modelo de GEV para séries futuras da estação Porto Alegre (RCP 8.5 Diária).....	150
Tabela A-45. Coeficiente de determinação do melhor modelo de GEV para séries futuras da estação São Paulo (RCP 4.5 3-horas).	150
Tabela A-46. Coeficiente de determinação do melhor modelo de GEV para séries futuras da estação São Paulo (RCP 4.5 Diária).	151
Tabela A-47. Coeficiente de determinação do melhor modelo de GEV para séries futuras da estação São Paulo (RCP 8.5 3-horas).	151
Tabela A-48. Coeficiente de determinação do melhor modelo de GEV para séries futuras da estação São Paulo (RCP 8.5 Diária).	151
Tabela A-49. Parâmetros de ajuste do melhor modelo de GEV, para a estação Porto Alegre (RCP 4.5 3-horas).....	160
Tabela A-50. Parâmetros de ajuste do melhor modelo de GEV, para a estação Porto Alegre (RCP 4.5 Diária).....	160

Tabela A-51. Parâmetros de ajuste do melhor modelo de GEV, para a estação Porto Alegre (RCP 8.5 3-horas).	160
Tabela A-52. Parâmetros de ajuste do melhor modelo de GEV, para a estação Porto Alegre (RCP 8.5 Diária).	161
Tabela A-53. Parâmetros de ajuste do melhor modelo de GEV, para a estação São Paulo (RCP 4.5 3-horas).....	161
Tabela A-54. Parâmetros de ajuste do melhor modelo de GEV, para a estação São Paulo (RCP 4.5 Diária).	161
Tabela A-55. Parâmetros de ajuste do melhor modelo de GEV, para a estação São Paulo (RCP 8.5 3-horas).....	161
Tabela A-56. Parâmetros de ajuste do melhor modelo de GEV, para a estação São Paulo (RCP 8.5 Diária).	162
Tabela A-57. Intensidade máxima de precipitação para a estação Porto Alegre (RCP 4.5 3-horas), em mm/h, para os diferentes tempos de retorno.	162
Tabela A-58. Intensidade máxima de precipitação para a estação Porto Alegre (RCP 4.5 Diária), em mm/h, para os diferentes tempos de retorno.	163
Tabela A-59. Intensidade máxima de precipitação para a estação Porto Alegre (RCP 8.5 3-horas), em mm/h, para os diferentes tempos de retorno.	164
Tabela A-60. Intensidade máxima de precipitação para a estação Porto Alegre (RCP 8.5 Diária), em mm/h, para os diferentes tempos de retorno.	165
Tabela A-61. Intensidade máxima de precipitação para a estação São Paulo (RCP 4.5 3-horas), em mm/h, para os diferentes tempos de retorno.	165
Tabela A-62. Intensidade máxima de precipitação para a estação São Paulo (RCP 4.5 Diária), em mm/h, para os diferentes tempos de retorno.....	166
Tabela A-63. Intensidade máxima de precipitação para a estação São Paulo (RCP 8.5 3-horas), em mm/h, para os diferentes tempos de retorno.	166
Tabela A-64. Intensidade máxima de precipitação para a estação São Paulo (RCP 8.5 Diária), em mm/h, para os diferentes tempos de retorno.	167

LISTA DE ABREVIATURAS

CDF	<i>Cumulative Distribution Function</i>
CMIP5	<i>Coupled Model Intercomparison Project 5</i>
DC	<i>Delta Change</i>
CIA	Critério de Informação Akaike
DPMA	Desvio Percentual Médio Absoluto
EbA	<i>Ecosystem-based Adaptation</i>
EDCDFm	<i>Equidistant CDF Matching method</i>
EQM	<i>Equidistance Quantile Matching Method</i>
EQM _{NS}	<i>Non-Stationary Equidistance Quantile Matching Method</i>
GCM	<i>General Circulation Model</i>
GEV	<i>Generalized Extreme Value</i>
IAG	Instituto de Astrofísica, Geociências e Ciências Atmosféricas
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDF	Intensidade-duração-frequência
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
MM5	<i>Mesoscale Model</i>
ONU	Organização das Nações Unidas
PDDrU	Plano Diretor de Drenagem Urbana
PDO	<i>Pacific Decadal Oscillation Index</i>
PNAMC	Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima
PNMC	Política Nacional sobre Mudança do Clima
QM	<i>Quantile-Mapping</i>
RCM	<i>Regional Climate Model</i>
RCP	<i>Representative Concentration Pathways</i>

RMSP	Região Metropolitana de São Paulo
RQME	Raiz do Quadrado Médio do Erro
SNIS-AP	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – Águas Pluviais
WRF	<i>Weather Research and Forecast Model</i>
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS.....	4
3 CURVAS INTENSIDADE-DURAÇÃO-FREQUÊNCIA (IDF).....	5
3.1 Eventos extremos de precipitação	5
3.2 Relações IDF e Equações IDF	5
3.3 Tendências em eventos extremos de precipitação	8
3.4 Medidas de Adaptação Climática	10
3.4.1 <i>Análise de Tendências Observadas (Não-estacionariedade)</i>	11
3.4.2 <i>Projeções Climáticas</i>	14
3.4.2.1 Modelos Climáticos	15
3.4.2.2 Cenários de emissão de gases de efeito estufa	18
3.4.2.3 Métodos de remoção de viés e downscaling (geração de IDF's futuras)	20
3.4.2.4 Estudos de impactos de mudanças climáticas em relações IDF desenvolvidos.....	22
3.4.3 <i>Não-estacionariedade e Projeções Climáticas</i>	24
4 PANORAMA BRASILEIRO SOBRE DRENAGEM E MANEJO DE ÁGUAS PLUVIAIS E MUDANÇAS CLIMÁTICAS	25
4.1 Urbanização e Sistemas de Drenagem Urbana	25
4.2 Tópicos de Adaptação à Mudança Climática e Sistemas de Drenagem Urbana	27
4.3 Desafios para Adaptação Climática e Sistemas de Drenagem Urbana no Brasil.....	29
4.4 Oportunidades para Adaptação Climática e Sistemas de Drenagem Urbana no Brasil	32
4.4.1 <i>Institucional</i>	32
4.4.2 <i>Técnica</i>	33
5 MATERIAIS E MÉTODOS	35

5.1	Descrição Geral	35
5.2	Área de estudo	37
	5.2.1 <i>Porto Alegre</i>	38
	5.2.2 <i>São Paulo</i>	39
5.3	Produtos de modelos climáticos	41
5.4	Eventos extremos de precipitação	42
	5.4.1 <i>Função acumulada de probabilidade</i>	42
	5.4.2 <i>Avaliação dos modelos GEV</i>	44
	5.4.3 <i>Estimativa de eventos extremos de precipitação e curvas IDF</i>	46
5.5	Geração de curvas IDF.....	47
	5.5.1 <i>Período presente (IDFs históricas)</i>	47
	5.5.2 <i>Período futuro (IDFs adaptadas às mudanças climáticas)</i>	47
	5.5.2.1 <i>Equidistance Quantile Matching (EQM)</i>	48
	5.5.2.2 <i>Equidistance Quantile Matching Não-Estacionário (EQM_{NS})</i>	51
5.6	Avaliação de modelos climáticos	53
	5.6.1 <i>Análise da sensibilidade das precipitações intensas no futuro à escolha de diferentes modelos climáticos</i>	53
	5.6.2 <i>Avaliação dos modelos climáticos na representatividade de eventos extremos</i>	53
	5.6.3 <i>Expectativas de Mudança do Clima</i>	55
5.7	Avaliação dos impactos das mudanças climáticas nas curvas IDF	55
	5.7.1 <i>Análise de Tendência</i>	55
	5.7.2 <i>Mudança Relativa</i>	56
	5.7.3 <i>Intensidade da Precipitação</i>	57
	5.7.4 <i>Probabilidade de Ocorrência</i>	57
	5.7.5 <i>Análise de incertezas</i>	58
6	RESULTADOS	59
6.1	Análise aos dados históricos	60
	6.1.1 <i>Análise de tendência associada às precipitações intensas</i>	60
	6.1.1.1 <i>Estação 8º DISME – Porto Alegre</i>	60
	6.1.1.2 <i>Estação IAG-USP – São Paulo</i>	62
	6.1.2 <i>Intensidade máxima de precipitação (Curvas IDF)</i>	63
	6.1.2.1 <i>Estação 8º DISME – Porto Alegre</i>	63
	6.1.2.2 <i>Estação IAG-USP – São Paulo</i>	65

6.2 Avaliação dos Modelos Climáticos	67
6.2.1 Incertezas associadas à adoção de modelos climáticos.....	67
6.2.2 Pontuação de Taylor.....	68
6.2.3 Expectativas de Mudanças do Clima	73
6.3 Impactos das Mudanças Climáticas em Curvas IDF	74
6.3.1 Análise de tendências associadas às séries de precipitações máximas anuais futuras	75
6.3.2 Curvas IDF adaptadas	76
6.3.2.1 Estação 8º DISME – Porto Alegre	76
6.3.2.2 Estação IAG-USP – São Paulo	78
6.3.3 Mudança Relativa	80
6.3.3.1 Estação 8º DISME – Porto Alegre	80
6.3.3.2 Estação IAG-USP – São Paulo	83
6.3.4 Probabilidade de Excedência	86
6.3.5 Análise de incertezas.....	90
7 LIMITAÇÕES E INCERTEZAS	96
8 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	99
REFERÊNCIAS.....	104
APÊNDICE I – ANÁLISE DE TENDÊNCIA ÀS SÉRIES DE PRECIPITAÇÕES MÁXIMAS ANUAIS NO PERÍODO PRESENTE (HISTÓRICO)	123
APÊNDICE II – VARIABILIDADE DA INTENSIDADE DE PRECIPITAÇÕES INTENSAS NO FUTURO USANDO DIFERENTES MODELOS CLIMÁTICOS.....	130
APÊNDICE III - ANÁLISE DE TENDÊNCIA ÀS SÉRIES DE PRECIPITAÇÕES MÁXIMAS ANUAIS PARA O PERÍODO FUTURO – MEDIANA DOS MODELOS (-2099)	139

1 INTRODUÇÃO

Mudanças nos padrões do clima, independente da fonte de mudança (e.g., aquecimento global ou ações locais, como a urbanização), em particular, os eventos extremos de precipitação, têm emergido como um desafio ao planejamento dos recursos hídricos. A condição de mudança nos padrões de precipitação já vem sendo observada e discutida nas últimas décadas em diferentes partes do mundo (BALLING; GOODRICH, 2011; IPCC, 2014; ALEXANDER; ARBLASTER, 2017; ASFAW *et al.*, 2018). Para o período futuro, produtos de modelos climáticos associados a cenários de emissões de gases de efeito estufa surgem como elementos de avaliação dos impactos e expectativas do clima. A magnitude e frequência das precipitações intensas tendem a aumentar em várias regiões do mundo, especialmente em regiões de médias e altas latitudes (EMORI; BROWN, 2005; SEN; KAHYA, 2021).

Uma das formas de quantificar o comportamento das chuvas em um determinado local é através das Curvas Intensidade-Duração-Frequência (IDF), pois são instrumentos que unificam as características das precipitações intensas e, por esta razão, são utilizadas como elementos de dimensionamento, planejamento e gestão de riscos associados aos recursos hídricos e a infraestrutura associada. Curvas IDF são geralmente desenvolvidas com base em uma análise estacionária de frequência de extremos aplicadas às precipitações máximas anuais obtidas para uma determinada estação pluviométrica. Isso significa que a probabilidade associada às precipitações intensas se mantém constante ao longo de um determinado período.

Dados os efeitos de mudança do clima, a abordagem tradicional pode não ser mais adequada na estimativa de IDF pois: (i) curvas IDF são desenvolvidas para dados observados, isto é, dados históricos, e podem não ser adequadas em representar condições futuras (BERGGREN, 2008; SRIVASTAV; SCHARDONG; SIMONOVIC, 2014); (ii) IDFs estimadas sob modelagem estacionária podem não ser válidas na representação das reais condições da intensidade de precipitação (AGILAN; UMAMAHESH, 2015; 2017). Exemplos dos impactos da abordagem tradicional são: o aumento do risco hidrológico ou probabilidade de falha de estruturas e do zoneamento de áreas inundáveis. Sendo assim, as condições mencionadas alertam para a necessidade de investigação e análise do comportamento não-estacionário e consideração de simulações do clima na produção de IDFs futuras como medida de adaptação climática.

A produção de IDF's futuras tem diferentes perspectivas. Por um lado, o uso de covariante pode ser associado à análise de frequência para introduzir não-estacionariedade às estimativas de intensidade. Tempo e outras variáveis hidro-meteorológicas são exemplos de covariantes em potencial (THIOMBIANO *et al.*, 2017; MONDAL; DANIEL, 2019). Todavia, tipo de distribuição de probabilidade, tamanho da série de dados e método de estimativa de parâmetros são fontes de incertezas relacionadas à análise de frequência não-estacionária (OUARDA; CHARRON; ST-HILAIRE, 2020).

Por outro lado, projeções de mudança do clima são promissoras na geração de IDF's futuras, especialmente dada a disponibilidade de cenários futuros (BUTCHER *et al.*, 2021; SEN; KAHYA, 2021). Neste caso, modelos climáticos, como os *General Circulation Models* (GCMs – Modelos de Circulação Geral ou Modelos Climáticos Globais) e *Regional Climate Models* (RCMs – Modelos Climáticos Regionais), cenários de emissão de gases de efeito estufa (na forma de *Representative Concentration Pathways* - RCPs) e técnicas de *downscaling* são fontes de incerteza (ALAM; ELSHORBAGY, 2015). Mais recentemente, metodologias que combinam ambas as perspectivas também foram reportadas (GANGULI; COULIBALI, 2019). Apesar das incertezas e o efeito das escolhas quando da produção de IDF's futuras não ser totalmente entendido, elas ajudam a prever comportamentos futuros (COOK; MCGINNIS; SAMARAS, 2020).

No Brasil, os impactos das mudanças climáticas já vêm sendo avaliados há alguns anos, com alguma confiabilidade. No entanto, no tocante à adaptação climática, e com base nos instrumentos legais atualmente vigentes, na prática poucos avanços foram desenvolvidos, embora o Brasil possua capacidade técnica para o desenvolvimento de estratégias adaptativas. De acordo com as projeções do clima, são esperados aumentos nas precipitações de diferentes durações, inclusive na região Nordeste (SABÓIA *et al.*, 2017). Trabalhos com maior nível de detalhamento, englobando observações e projeções são encontrados para região metropolitana de São Paulo, na região Sudeste (LIMA; RUEDA, 2018; SCHARDONG; SRIVASTAV; SIMONOVIC, 2014; SILVA DIAS *et al.*, 2013).

Atualmente, produtos climáticos baseados no modelo Eta estão disponíveis no Brasil (e América do Sul), operado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). O modelo Eta é um RCM acoplado a 04 GCMs que contêm produtos climáticos

baseados nos cenários de emissão de gases de efeito estufa RCP 4.5 e RCP 8.5 e resolução espacial de 20-km (com resolução de 5-km também para a região Sudeste da América do Sul). A última versão do Eta contém produtos em resolução temporal diária e 3-horas). Trabalhos recentes como o de Silva *et al.* (2021a) e Brêda (2021) são exemplos de estudos que exploram o modelo Eta com a finalidade de avaliação dos impactos das mudanças climáticas em eventos intensos. Silva *et al.* (2021b) apresentaram recentemente uma metodologia que une não-estacionariedade e mudanças climáticas na avaliação dos impactos em curvas IDF, parte da presente Tese de Doutorado; contudo, essa metodologia ainda não foi aplicada e avaliada em dados de precipitação no Brasil ou utilizando o modelo Eta como ferramenta de produtos climáticos.

Diante do exposto acima, a presente Tese de Doutorado se propõe a analisar o efeito de condições não-estacionárias na produção de curvas IDFs no período futuro, comparando-as às curvas IDFs produzidas para o período histórico. Essa pesquisa busca elucidar algumas questões relacionadas aos impactos das mudanças climáticas sobre as precipitações intensas apresentadas no formato de curvas IDF, aplicadas a duas estações pluviográficas e utilizando o modelo Eta para o horizonte de 2099. São elas: (i) O modelo Eta é capaz de representar as estimativas de precipitações intensas no período histórico ou observado? (ii) Quais as expectativas de mudanças das precipitações intensas sob o efeito de mudanças do clima? (iii) Existem diferenças nas estimativas de intensidade de precipitação, no futuro, considerando distribuições de probabilidade estacionária e não-estacionária? Destaca-se que, embora haja conhecimento acerca das incertezas quando da geração de IDFs sob os efeitos de mudanças climáticas, não foi proposta deste trabalho avaliar conjuntamente estas incertezas.

2 OBJETIVOS

A produção de relações IDF por vezes negligencia tendências associadas às precipitações máximas anuais. Isso impacta diretamente no dimensionamento de infraestrutura e planejamento de bacias hidrográficas. Com os efeitos das mudanças climáticas, espera-se que esses impactos sejam intensificados, aumentando a preocupação acerca da ocorrência de eventos intensos. Ainda, é comum que as relações IDF sejam construídas sob condições estacionárias, e deste modo, podem mascarar as estimativas de precipitações intensas.

Deste modo, o presente trabalho tem como objetivo geral introduzir e avaliar os possíveis efeitos da não-estacionariedade na geração de IDFs adaptadas às mudanças climáticas.

Outros objetivos específicos também são destacados:

- Analisar desafios e oportunidades ao Brasil no contexto de adaptação climática associada aos sistemas de drenagem e manejo de águas pluviais urbanas;
- Desenvolver uma metodologia de geração de IDFs não-estacionárias no período futuro;
- Avaliar a aplicabilidade dos produtos de precipitação do modelo climático Eta na representação de eventos intensos de precipitação;
- Comparar IDFs futuras produzidas sob abordagem estacionária e não-estacionária.

3 CURVAS INTENSIDADE-DURAÇÃO-FREQUÊNCIA (IDF)

3.1 Eventos extremos de precipitação

Eventos de precipitações extremas ou precipitações intensas têm um papel importante no desenvolvimento do ambiente e estão geralmente apontados como a causa da ocorrência de desastres naturais. Por definição, são eventos raros que ocorrem em um determinado lugar e período (IPCC, 2013). Chuvas torrenciais e períodos de estiagens prolongadas são exemplos de eventos extremos, provocando impactos adversos na agricultura (EEKHOUT *et al.*, 2018), infraestrutura (ZHU; CHEN, 2017), serviços de transporte (DALAGNOL *et al.*, 2021), economia (GU *et al.*, 2022), saúde e bem-estar humano (LI *et al.*, 2021).

A definição de um evento raro de precipitação varia por região, dada a variabilidade pluviométrica espacial. Localização, topografia, clima global, clima local e outros índices climáticos são alguns elementos que podem potencializar eventos extremos. Exemplos desses eventos são: (i) 698 mm precipitados em Maceió, durante o mês de maio em 2017 (TERRA, 2017); (ii) o ocorrido em Belo Horizonte (Minas Gerais, Brasil) em janeiro de 2020 – 320,9 mm acumulados em 03 dias (INMET, 2020); e (iii) ocorrido na cidade de Nova Iorque (Estados Unidos), em setembro de 2021 – 181,1 mm acumulados em um dia (METSUL, 2021).

Desde 1980, 4.588 eventos intensos foram reportados em 172 países, expondo 2,2 bilhões de pessoas e sendo responsáveis por danos de até 1 trilhão de dólares americanos (MARSH MCLENNAN, 2021). No Canadá, por exemplo, de acordo com o *Catastrophe Indices and Quantification Inc.*, os 10 maiores anos em danos, decorrentes de precipitações intensas, ocorreram nos últimos 22 anos (INSURANCE BUREAU OF CANADA, 2020).

3.2 Relações IDF e Equações IDF

Eventos extremos de precipitação são avaliados com base na análise de frequência de uma série de dados. Dentre os diversos métodos disponíveis para as mais variadas finalidades, é comum o uso de métodos aplicados a série de precipitações máximas anuais. Este método sugere a geração de estimativas de precipitações intensas, geradas para um posto de monitoramento suficientemente representativo. Séries de precipitação com boa representatividade são tipicamente

disponíveis para um período de, pelo menos, 30-40 anos (EGGER; MAURER, 2015). Para correta precisão de eventos extremos, faz-se importante a existência de registros de precipitação de duração sub-diárias (menor que 1 dia) e até sub-horárias (menor que 1 hora).

São três os elementos que, quando relacionados, produzem as relações IDF:

- Intensidade máxima média da precipitação: é a altura de chuva por unidade de tempo. Seu cálculo depende das demais variáveis.
- Duração da precipitação: corresponde ao período de ocorrência do evento de precipitação, tendo teoricamente sua condição crítica quando é igual ao tempo de concentração da bacia, pois significa que toda a bacia está contribuindo para geração de escoamento;
- Frequência da precipitação: está relacionada com o período médio de repetição de um dado evento. É o parâmetro que limita a definição de um evento raro (menos frequente). É geralmente expressa no formato de tempo de retorno, como exemplo, “2 anos” ou “100 anos”. Sob esse formato, a probabilidade de um evento de precipitação ocorrer em um dado ano é determinado pelo inverso do tempo de retorno, como: “A probabilidade anual de um evento de 100 anos é, em média, 1 em 100, ou 1%.

As relações IDF são obtidas a partir de análises estatísticas de frequência de precipitações máximas de diferentes durações. O uso de distribuição estatística que caracterize os eventos extremos, com confiança, e estime chuvas de projeto é de grande importância (GU *et al.*, 2022). Distribuições de probabilidade estatísticas para este fim geralmente utilizadas são as de Gumbel e GEV (Generalizada de Valores Extremos – Generalized Extreme Value), Log-Pearson, Exponencial (NAGHETTINI; PINTO, 2007). Embora haja uma gama de distribuições de probabilidade de eventos extremos, observa-se na literatura uma dominância do uso da distribuição de GEV em relação as demais (MARTINS; STEDINGER, 2000; EL ADLOUNI, 2007; KIM *et al.*, 2017).

Seja uma série de precipitação máxima anual denotada por $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ independente e identicamente distribuída por uma distribuição acumulada de probabilidade GEV. A distribuição de probabilidades GEV é uma família de três distribuições combinadas em uma: (i) Gumbel, (ii) Frechét, e (iii) Weibull, sendo

aplicada em diversos estudos de precipitações intensas (AGILAN; UMAMAHESH, 2015; 2017; CHENG *et al.*, 2014). A função acumulada de GEV $F(x)$ é dada pela Equação (3-1) (COLES, 2001):

$$F(X; \mu, \sigma, \xi) = \begin{cases} \exp \left\{ - \left[1 + \frac{\xi(x - \mu)}{\sigma} \right]^{-1/\xi} \right\}, \sigma > 0, 1 + \frac{\xi(x - \mu)}{\sigma}, \xi \neq 0 \\ \exp \left\{ - \exp \left[- \frac{(x - \mu)}{\sigma} \right] \right\}, \sigma > 0, \xi = 0 \end{cases} \quad (3-1)$$

em que: μ é o parâmetro de localização, que descreve a posição da distribuição; σ é o parâmetro de escala, que descreve a dispersão da distribuição; e ξ é o parâmetro de forma, que descreve o comportamento da cauda da distribuição. $\xi > 0$ representa o caso Frechét, em que a função densidade decresce em uma taxa reduzida; $\xi < 0$ representa o caso Weibull, usual para eventos intensos de mínimos; e $\xi = 0$ representa o caso Gumbel, com a cauda ilimitada.

A função inversa de GEV é usada para estimar as precipitações intensas, baseada no risco hidrológico (probabilidade de excedência ou frequência) de tempo de retorno $TR = (1/(1-F))$. Para $\xi \neq 0$, a máxima precipitação para um determinado tempo de retorno TR é dada a partir da Equação (3-2):

$$p_{TR} = \mu + \frac{\sigma}{\xi} \left[1 - \left\{ - \ln \left(1 - \frac{1}{TR} \right) \right\}^\xi \right] \quad (3-2)$$

Obtidas diversas precipitações máximas para diferentes durações e tempos de retorno, é possível ajustar equações que representem as relações IDF. Há diversas maneiras de equacionar as relações IDF, e a formulação comumente encontrada na literatura possui o formato da Equação (3-3):

$$I = \frac{aTR^b}{(td + c)^d} \quad (3-3)$$

em que: I é a intensidade máxima de precipitação (mm/h); td é o tempo de duração (minutos); TR é o tempo de retorno (anos); a , b , c e d são os coeficientes de ajuste da equação.

A representação gráfica das relações IDF é apresentada conforme a Figura 3-1, também conhecida como curvas IDF. Ainda de acordo com a figura, observa-se que, para uma mesma localidade, apresenta-se uma família de curvas, cada qual para uma probabilidade de ocorrência ou tempo de retorno associado.

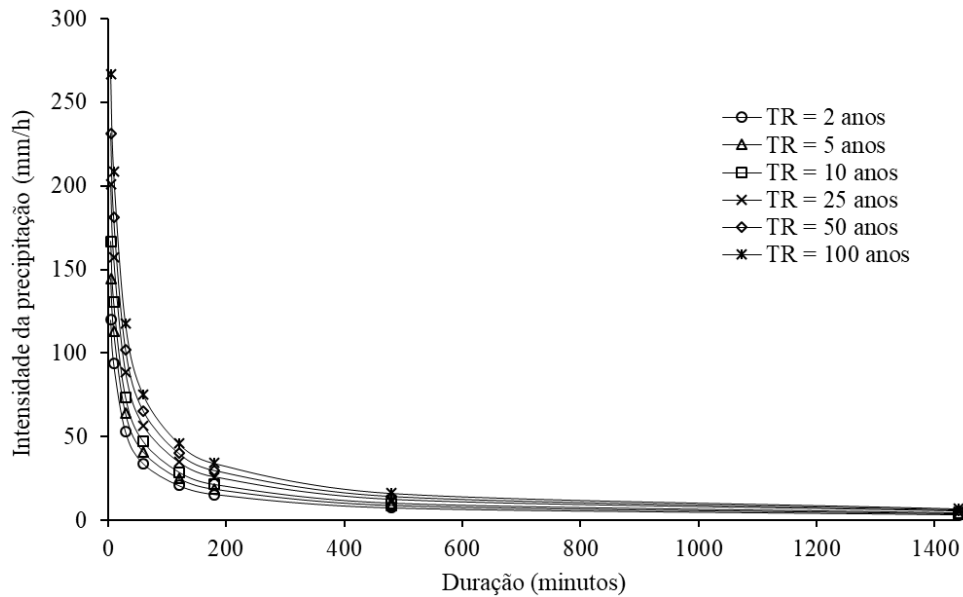


Figura 3-1. Exemplo de curva IDF para o posto meteorológico 8º DISME, Porto Alegre, RS, Brasil. Fonte: HELFER; DORNELLES; GOLDENFUM (2017).

3.3 Tendências em eventos extremos de precipitação

O Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC*) define o termo “mudança climática” como variações na média e/ou propriedades, que persistem por um extenso período, usualmente por décadas. Mudanças climáticas podem ser decorrentes de processos naturais globais ou fatores externos, como os antropogênicos, que modificam a composição da atmosfera ou uso do solo (IPCC, 2013). O aumento da temperatura global tende a aumentar a umidade presente na atmosfera e, em consequência, alterar o padrão de ocorrência das precipitações, em magnitude e frequência (ALEXANDRA, 2018; MAGRIN *et al.*, 2014). Em áreas urbanas, mais especificamente em áreas densamente urbanizadas ou circunvizinhas, as ilhas de calor urbanas são responsáveis por alterar as propriedades térmicas do ambiente, impactando no processo de formação de chuvas e podendo intensificar a ocorrência de chuvas convectivas (JIN; SHEPERD, 2005; MC GRANE, 2016). Variabilidade climática, por outro lado, refere-se a variações no clima em escalas espaciais e temporais, devido a processos internos do sistema climático ou forçantes externas (IPCC, 2013). Dada a influência da variabilidade natural do clima, é comum que a mesma seja confundida com mudança do clima, dificultando a análise de tendências associadas às mudanças climáticas (JAKOB; WALLAND, 2016). Segundo Gao *et al.* (2018), em análises às precipitações máximas diárias em região costeira na China, a mudança natural do

clima contribui mais para tendências em médias, enquanto as atividades humanas tendem a aumentar mais a variância, sendo esta de maior impacto às precipitações intensas.

Os efeitos da variabilidade e mudanças climáticas já são observados em todo o planeta (EASTERLING *et al.*, 2000). Trabalhos voltados à avaliação da tendência de séries temporais de precipitação têm sido largamente explorados. Desde o primeiro relatório do IPCC (IPCC, 1990), tendências positivas apontam o aumento das precipitações nas áreas extra-tropicais e negativa nas áreas subtropicais. De acordo com Emori e Brown (2005), muitas regiões do planeta, localizadas em médias e altas latitudes, podem aumentar consideravelmente a precipitação média e eventos extremos. Globalmente, observações em precipitações extremas apresentam tendências de crescimento desde 1901, com pelo menos 1/5 da superfície global apresentando aumento nas precipitações máximas durante o último século (ASADIEH; KRAKAUER, 2015); entretanto, é importante enfatizar que existe uma forte variação regional e sub-regional, uma vez que as variações na intensidade das precipitações possuem alta dependência geográfica (MEEHL *et al.*, 2000). Por exemplo, são apontadas tendências de aumento das precipitações extremas em regiões da Leste Europeu, Canadá e Leste da China (DONAT *et al.*, 2016; HU *et al.*, 2015; TAN; GAN; SHAO, 2017).

Em áreas urbanas, como efeitos decorrentes da urbanização (e.g., produção de ilhas de calor, e redução do potencial de infiltração do solo e decorrente aumento de escoamento superficial, que porventura tende a causar alagamentos e inundações urbanas) as precipitações intensas de áreas urbanas tendem a superar as precipitações intensas das regiões rurais circunvizinhas (SILVEIRA, 1997). Ainda, como consequência à densa ocupação urbana, existe tendência de incremento das precipitações intensas em maior grau em áreas urbanas que em áreas rurais, indicando maior impacto que os efeitos das mudanças climáticas globais. Exemplos destas observações foram identificadas na Holanda por GOLROUDBARY *et al.* (2017), ao avaliar tendências em precipitações intensas em áreas urbanas e rurais ao redor do país; em Beijing, cuja tendência de aumento em precipitações intensas é mais pronunciada em áreas urbanas que rurais (YANG *et al.*, 2017). Esses resultados se mostram semelhantes aos advindos das pesquisas de Zhu *et al.* (2019), que

observaram maior frequência e volume de chuva nas áreas urbanas com maior densidade populacional do que em qualquer outra área.

As informações apresentadas nesta seção indicam que, de fato, um aumento na intensidade de precipitação, em magnitude e frequência, já é observado em diferentes partes do mundo. Ainda, enfatizam a importância de entender como a mudança ocorre, seus possíveis porquês e como minimizar seus impactos. Isso porque a mudança do clima tende a piorar este cenário, dado o adicional incremento de aquecimento global (IPCC, 2021).

Em áreas densamente urbanas, os impactos são ainda mais preocupantes, pois afetam um maior número de pessoas em uma menor área e em diferentes níveis, desde eventos mais frequentes até eventos mais raros, uma vez que se apresenta como uma pressão adicional à infraestrutura urbana (MARKOLF *et al.*, 2021). Por outro lado, em regiões ribeirinhas, os eventos mais raros têm destaque, pois seus impactos são mais expressivos e uma mudança no padrão dos eventos de precipitação afeta diretamente as estratégias de mitigação do risco, a exemplo do zoneamento de áreas inundáveis.

3.4 Medidas de Adaptação Climática

O aumento em magnitude e frequência das precipitações intensas tendem a desafiar as atuais ferramentas de projeto, planejamento e gestão (YOUSEF; OUARDA, 2015). Por um lado, as observações já notificam mudança nos padrões de precipitação; por outro lado, as mudanças climáticas decorrentes dos efeitos do aquecimento global tendem a intensificar esta problemática, indicando a necessidade de adaptação climática.

Adaptação climática é definida como “*processo de ajuste ao clima atual ou esperado e seus efeitos*” (IPCC, 2013). Na perspectiva das precipitações, a estimativa de precipitação intensa atual é determinada para um risco associado, baseada em um tempo de retorno. Para introdução de medidas adaptativas às mudanças climáticas não é diferente. Se, no presente, o risco admitido é calculado em termos de intensidade da precipitação (curvas IDF-presente), e essa intensidade vai aumentar no futuro, é correto afirmar que estimar curvas IDF-futuro é uma maneira eficiente a ser aplicada no planejamento de medidas de adaptação climática. Em outras palavras, a geração de curvas IDF-futuro pode então ser reconhecida como uma medida de

adaptação climática. Outras medidas de adaptação climática já vêm sendo apontadas na redução dos impactos das mudanças do clima e aumento da resiliência; entretanto, não é comum que essas medidas contemplem, em termos quantitativos os efeitos de mudança do clima, sendo capazes de minimizar quaisquer incrementos que não necessariamente seja decorrente de mudanças climáticas (SEMADENI-DAVIES *et al.*, 2008).

Um incremento nas tendências de máximas diárias e precipitações sub-diárias tem sido uma realidade e deve ser quantificada por meio de curvas IDF adaptadas para tal alteração (AL MAMOON *et al.*, 2016; ARNBJERG-NIELSEN, 2012; MIRHOSSEINI *et al.*, 2014). Se a tendência das mudanças climáticas se confirmar de fato, é evidente que muitas das estruturas projetadas e decisões relacionadas aos recursos hídricos utilizando a IDF baseada apenas em dados históricos, poderá falhar mais frequentemente em sua vida útil de projeto (SCHARDONG; SRIVASTAV; SIMONOVIC, 2014) ou ter um tempo de recorrência diferente do esperado. Trabalhos abrangendo essa problemática, geralmente envolvem: (i) a extrapolação da tendência de precipitação ao futuro via análise não-estacionária; e (ii) o uso de projeções climáticas de precipitação para adaptação de IDFs.

3.4.1 Análise de Tendências Observadas (Não-estacionariedade)

No item 3.2, são apresentados métodos de distribuição estatística associados à geração de curvas IDF. Tradicionalmente, estes métodos assumem uma condição estacionária, isto é, a frequência dos eventos de precipitação intensa é constante. Em outras palavras, a probabilidade associada aos eventos intensos é mantida ao longo dos anos. Em linguagem estatística, assumir estacionariedade equivale a admitir que os parâmetros de distribuição das variáveis hidrológicas permanecem constantes ao longo do tempo, sem maiores flutuações ou tendências. Contudo, em um cenário de mudança do clima, esta condição pode não ser mais válida, e as IDFs estacionárias não representariam adequadamente as condições futuras. Esta condição é definida como não-estacionária, e ganhou bastante interesse da comunidade científica após a publicação "*Stationary is dead: Whither water management?*" (MILLY *et al.*, 2008). Ao supor um aumento na frequência da precipitação ao longo do tempo, assume-se o aumento da sua probabilidade de ocorrência, e em outras palavras, redução do tempo de retorno para qual a estrutura fora dimensionada, ao longo dos anos. Tais aspectos

corroboram com a necessidade da introdução de curvas IDF não-estacionárias, provendo maior suficiência do sistema ao longo da sua vida útil (MAILHOT; DUCHESNE, 2010). A Figura 3-2 apresenta um esquema dos comportamentos estacionário e não-estacionário, assumindo aumento dos eventos extremos.

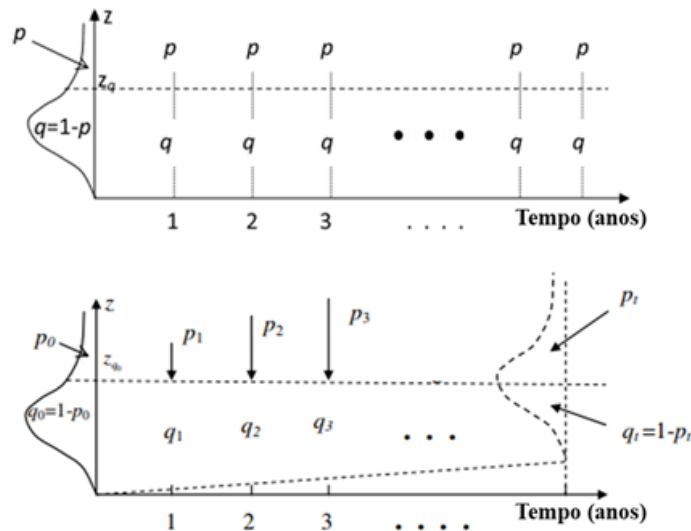


Figura 3-2. Esquematisação do comportamento estacionário (acima) e não-estacionário (abaixo), em relação a probabilidade de excedência (p) e não-excedência (q). Fonte: SALAS; OBEYESEKERA (2014).

Conceitualmente, um comportamento não-estacionário de uma variável aleatória (parâmetros) é definido pela sua dependência a outra(s) variável(is) (covariável (is) ou covariante (s)). A introdução do conceito de não-estacionariedade pode-se basear em diferentes abordagens, com objetivo de melhoria do ajuste e redução de incertezas, distinguindo-se pela covariante admitida.

Estudos recentes têm adotado o uso de estatísticas de eventos extremos baseada na Teoria dos Valores Extremos para inclusão de não-estacionariedade e adaptação de curvas IDF (CHENG *et al.*, 2014; AGILAN; UMAMAHESH, 2017; OUARDA; YOUSEF; CHARRON, 2018). A não-estacionariedade é incluída como função de tendência aos parâmetros de localização e escala dos parâmetros da distribuição, utilizando-se de um ou mais covariantes.

Algumas abordagens atribuem índices climáticos como covariantes dos parâmetros da distribuição de probabilidade utilizada (EL ADLOUNI *et al.*, 2007; OUARDA; YOUSEF; CHARRON, 2018). No Brasil, exemplos de índices climáticos geralmente influentes nas precipitações são: El Niño, La Niña, ZCAS (Zona de Convergência do Atlântico Sul) e ZCIT (Zona de Convergência Intertropical) (SILVA

DIAS *et al.*, 2013). Esses índices climáticos podem também possuir sazonalidade inferior a um ano e, nesse sentido, sugere-se que sejam adotadas outras metodologias de geração de IDFs, a exemplo do *Peaks Over Thresholds* (POT – Picos Além do Limite), que se utilizam de valores acima de um determinado limite, ao invés de um valor máximo único anual (AGILAN; UMAMAHESH, 2015). O tempo também é um covariante, principalmente dada a facilidade de associação com critérios de projeto, como tempo de retorno e vida útil. Esses critérios são semelhantes aos assumidos por Rootzén e Katz (2013), denominado pelos autores de “*Design Life Level*”. Contudo, é comum que os melhores ajustes ainda estejam relacionados ao uso de índices climáticos ou outros processos (AGILAN; UMAMAHESH, 2017; OUARDA; YOUSEF; CHARRON, 2018).

A dependência de um covariante em relação à função de tendência adotada pode ter qualquer forma que promova o melhor ajuste aos dados. Funções do tipo linear, polinomial e exponenciais são as mais frequentes em estudos hidrometeorológicos (MAILHOT; DUCHESNE, 2010; CHENG *et al.*, 2014; GANGULI; COULIBALY, 2017). Ainda, a dependência de precipitações intensas a índices climáticos ou outro covariante se trata de uma abordagem complexa, sujeita a avaliação prévia de significância e do quanto o(s) covariante(s) influencia(m) nas precipitações intensas. A disponibilidade de dados concomitantes que permitam tal análise também é um fator a ser considerado. Segundo Cheng e AghaKouchak (2014), a inclusão de teste de hipótese de estacionariedade evita a implementação de covariáveis em análises de extremos que não mostram variação significativa ao longo do tempo, ou seja, testar a série é importante para decidir se é necessária a introdução do conceito de não-estacionariedade.

Adaptar equações IDF tem sido uma prática recorrente no contexto das mudanças climáticas. Além de promover comparações e magnitude do impacto dessas mudanças, pode ser uma ferramenta importante no dimensionamento do sistema de drenagem, contribuindo para que o sistema de drenagem esteja adaptado às mudanças estimadas (CHENG; AGHACOUCHAK, 2014). Contudo, nem sempre a adoção da não-estacionariedade conduzirá a significantes diferenças nas estimativas de precipitação máxima (GANGULI; COULIBALY, 2017). Portanto, análises robustas que validem as vantagens de IDFs não-estacionárias ao invés das IDFs estacionárias são necessárias.

As discussões aqui impostas apontam a necessidade de avaliação e possível consideração de curvas IDF não-estacionárias como ferramenta de planejamento. Salienta-se as limitações associadas ao uso de covariantes, principalmente no que concerne ao uso do tempo para tal finalidade. De acordo com Serinaldi e Kilsky (2015), as incertezas associadas à distribuição de extremos podem ser um limitante à sua correta quantificação e, embora um comportamento não-estacionário seja observado, sua modelagem ainda é complexa (GANGULI; COULIBALY, 2017; OUARDA; CHARRON; ST-HILAIRE, 2020), sugerindo então que *Stationary is undead* (em português: “Estacionariedade não está morta”). Por outro lado, Koutsoyiannis e Montanari (2015) defendem o uso de não-estacionariedade apenas em casos controlados, em que há previsões determinísticas, dado que seu uso para períodos futuros, em que haja mudanças, pode subestimar a variabilidade natural.

É comum que haja a extrapolação de IDFs não-estacionárias no período histórico para o período futuro. Contudo, esta abordagem pode não ser confiável, dados os múltiplos processos que controlam a ocorrência e intensidade da precipitação, especialmente frente as condições de mudança do clima. Em resumo, as tendências associadas às precipitações intensas no futuro podem não ser similares àquelas nas observações históricas, e assim, sugere-se o uso de projeções climáticas para esta finalidade.

3.4.2 Projeções Climáticas

Até aqui, foram destacadas observações e possibilidades acerca de alterações ou tendências nos padrões de precipitações intensas. As observações, entretanto, podem ser derivadas de diferentes fontes, as quais não foram analisadas e evidenciadas.

Projeções climáticas são baseadas em cenários de emissões de gases de efeito estufa. O aumento dessas emissões na atmosfera resulta no aumento na temperatura em várias regiões do mundo. Esse aumento altera o balanço de energia da Terra, promovendo variações no ciclo hidrológico e mudanças no clima, bem como: ondas de calor extremas e mais frequentes; aumento da frequência e intensidade de precipitações intensas e elevação do nível do mar, principalmente (BARBI; FERREIRA, 2014; FISCHER; KNUTTI, 2015; ALLAN *et al.*, 2020).

Em se tratando de projeções do clima para o período futuro, modelos climáticos e cenários de emissão de gases de efeito estufa são alternativas existentes para simulação do clima. Sendo assim, nesta seção serão destacadas algumas considerações acerca das mudanças climáticas e suas expectativas para o futuro. Para isso, uma série de fatores deve ser considerada. São eles: modelos climáticos, cenários de emissão de gases de efeito estufa e métodos de *downscaling*.

3.4.2.1 Modelos Climáticos

Modelos climáticos são ferramentas capazes de simular o sistema climático e prover informações sobre o clima no futuro, baseadas em cenários. Modelos climáticos de circulação geral (GCMs) são representações numéricas do sistema climático baseado nas propriedades físicas, químicas e biológicas da atmosfera, e suas interações com outros componentes que possam afetar o tempo e o clima (IPCC, 2013). São baseados em cálculos infinitesimais do escoamento e perturbações para resolução de equações como: quantidade de movimento, termodinâmica, continuidade, hidrostática, conservação de energia e conservação de massa (MARENGO *et al.*, 2014). GCMs utilizados atualmente fazem parte da 6ª fase do CMIP6 (Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados, *Coupled Model Intercomparison Project 6*), projeto de coparticipação entre diversos países com objetivo de modelar o sistema climático, embora produtos climáticos oriundos do CMIP5 ainda seja bastante utilizados, conforme apresentado na Tabela 3-1.

Apesar de promissores, GCMs possuem baixa resolução espacial, o que introduz limitações na representação de processos de mesoescala e topografia (CHOU *et al.*, 2014a; 2014b), impondo dificuldade na representação de eventos extremos (WILLEMS; VRAC, 2011), e introduzindo incertezas às projeções climáticas (COOK; MCGINNIS; SAMARAS, 2020) que, quando aplicada a modelos hidrológicos, reflete nas previsões de vazão.

Tabela 3-1. Lista de modelos GCM que fazem parte do CMIP5 usuais na avaliação de impacto das mudanças climáticas. Fonte: Silva et al. (2021b).

Modelo	Centro de Pesquisa	País	Resolução (Latitude x Longitude em graus)
BCC-CSM1	<i>Beijing Climate Center, China Meteorological Administration</i>	China	2,80 x 2,80
BCC-CSM1-1-M	<i>Beijing Climate Center, China Meteorological Administration</i>	China	2,80 x 2,80
BESM	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais	Brasil	0,25,1,00,2,00 x 1,00
BNU-ESM	<i>College of Global Change and Earth System Science</i>	China	2,80 x 2,80
CANESM2	<i>Canadian Center for Climate Modeling and Analysis</i>	Canadá	2,80 x 2,80
CCSM4	<i>National Center of Atmospheric Research</i>	Estados Unidos	0,94 x 1,25
CESM1-CAM5	<i>National Center of Atmospheric Research</i>	Estados Unidos	0,94 x 1,25
CNRM-CM5	<i>Centre Europeen de Recherches et de Formation Avancee en Calcul Scientifique</i>	França	1,40 x 1,40
CSIRO-Mk3-6-0	<i>Australian Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization in collaboration with the Queensland Climate Change Centre of Excellence</i>	Austrália	1,80 x 1,80
FGOALS-g2	<i>IAP (Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China) and THU (Tsinghua University)</i>	China	2,55 x 2,48
GFDL-CM3	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration's Geophysical Fluid Dynamics Laboratory</i>	Estados Unidos	2,50 x 2,00
GFDL-ESM2G	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration's Geophysical Fluid Dynamics Laboratory</i>	Estados Unidos	2,50 x 2,00
GFDL-ESM2M	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration's Geophysical Fluid Dynamics Laboratory</i>	Estados Unidos	2,50 x 2,00
HADGEM2-AO	<i>Met Office Hadley Centre</i>	Reino Unido	1,25 x 1,875
HADGEM2-ES	<i>Met Office Hadley Centre</i>	Reino Unido	1,25 x 1,875
IPSL-CM5A-LR	<i>Institut Pierre Simon Laplace</i>	França	3,75 x 1,80
IPSL-CM5A-MR	<i>Institut Pierre Simon Laplace</i>	França	3,75 x 1,80
MIROC5	<i>Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology</i>	Japão	1,41 x 1,41
MIROC-ESM	<i>Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology</i>	Japão	2,80 x 2,80
MIROC-ESM-CHEM	<i>Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology</i>	Japão	2,80 x 2,80
MPI-ESM-LR	<i>Max Planck Institute for Meteorology</i>	Alemanha	1,88 x 1,87
MPI-ESM-MR	<i>Max Planck Institute for Meteorology</i>	Alemanha	1,88 x 1,87
MRI-CGCM3	<i>Meteorological Research Institute</i>	Japão	1,10 x 1,10
NORESM1-M	<i>Norwegian Climate Center</i>	Noruega	2,50 x 1,90
NORESM1-ME	<i>Norwegian Climate Center</i>	Noruega	2,50 x 1,90

Uma maneira de melhorar a representação do clima a partir dos modelos climáticos é o *downscaling* dinâmico. Este procedimento implica na simulação de um modelo climático GCM aninhado a um outro modelo, de escala reduzida para uma determinada região geográfica. Geralmente o *downscaling* dinâmico acarreta no desenvolvimento de modelos climáticos regionais (RCMs). Teoricamente, o uso de modelos climáticos regionais reduz incertezas atribuídas a efeitos de mesoescala, como relevo, e podem ser mais precisos na representação de eventos convectivos que controlam chuvas intensas (CHOU *et al.*, 2014a), principalmente para RCMs de resolução espacial inferior a 4 km (PREIN *et al.*, 2015). Apesar de aparentemente simples, o desenvolvimento de RCMs exige um alto nível de processamento computacional, além de um refinado conhecimento dos fenômenos atmosféricos de pequena escala; por isso, o desenvolvimento e uso desses modelos é menos frequente. Além disso, para escalas reduzidas, como áreas ou bacias urbanas, faz-se necessário o uso do chamado *downscaling* estatístico, de modo a capturar informações de melhor resolução que reduza os vieses advindos dos modelos climáticos (Figura 3-3).

Em estudos de impactos das mudanças climáticas, a aplicação de modelos climáticos exige interpolação espacial dos produtos obtidos para a área de interesse. As incertezas inerentes ao uso de GCMs ou RCMs pode ser estimada a partir do uso do conjunto dos modelos (*ensemble*), que pode ser adotado em termos de médias, medianas, entre outros.

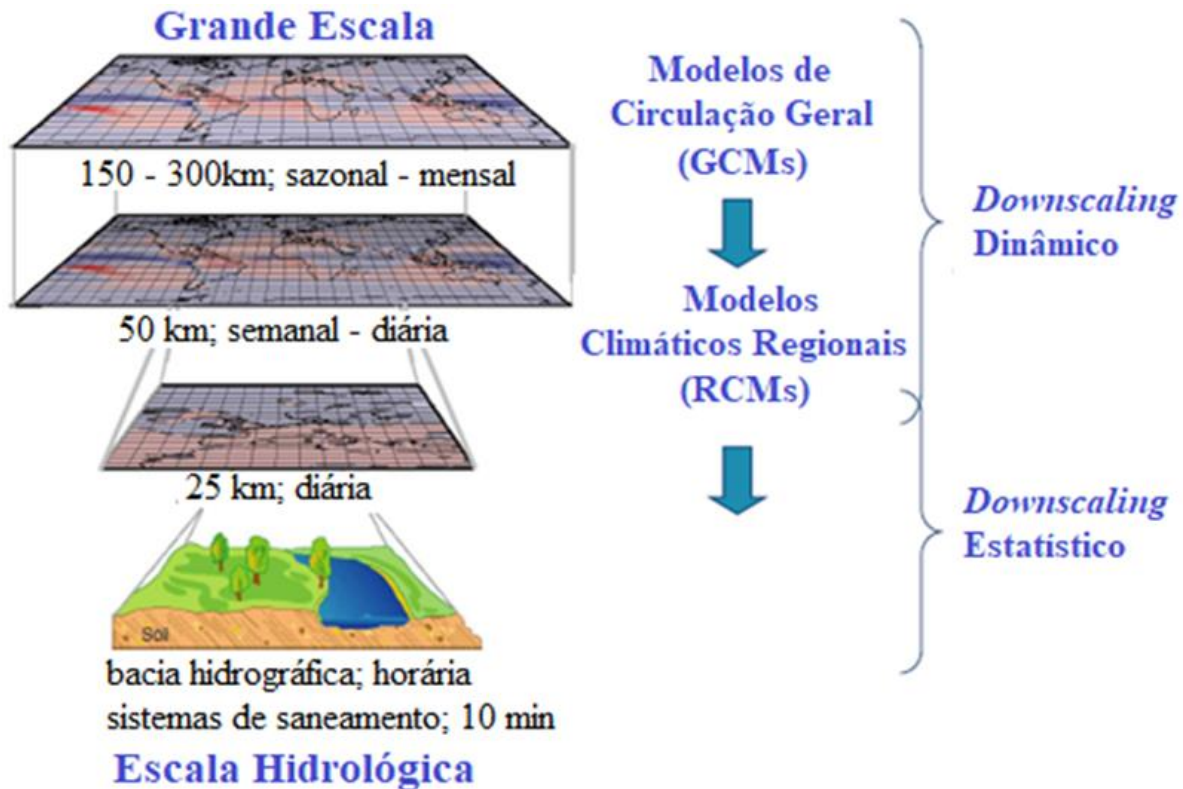


Figura 3-3. Representação de redução de escala para modelos climáticos em bacias pequenas¹. Fonte: WILLEMS (2010).

3.4.2.2 Cenários de emissão de gases de efeito estufa

A avaliação de impacto de mudanças climáticas envolve a adoção de cenários atribuídos ao clima no futuro, refletindo nas projeções. Segundo IPCC (2013), as projeções climáticas são respostas do sistema climático a um cenário de emissão futura ou concentração de gases de efeito estufa e aerossóis. Cenários de emissão, por sua vez, são definidos como representações simplificadas do clima futuro, baseado em relações climatológicas e construídas com base nas potenciais consequências de fatores antropogênicos.

Desde 2007, em seu quarto relatório sobre mudanças climáticas (AR4), o IPCC vem adotando um conjunto de cenários climáticos, com vistas à análise de impacto e proposição de mitigação e adaptação. No quinto relatório, esses cenários são conhecidos como RCPs (Cenários de Concentração Representativa – *Representative Concentration Pathways*).

¹ Em bacias de grande porte o *downscaling* estatístico pode não ser necessário.

RCPs são produtos de colaboração entre modeladores de avaliação integrados, modeladores climáticos, modeladores de ecossistemas terrestres e especialistas em inventário de emissões. A produção de RCPs é baseada na concentração de gases de efeito estufa presentes na atmosfera, a partir da emissão de gases, poluentes e uso do solo, sendo então contabilizada em forma de forçante radiativa (VAN VUUREN *et al.*, 2011). A quantificação dessa forçante radiativa, em W/m^2 , é calculada com base no efeito da concentração de gases no aumento da temperatura, em relação a temperatura no período pré-industrial.

Para o futuro, RCPs compreendem quatro projeções de níveis de forçante radiativa estimada. Esses níveis provocam variações na temperatura da Terra, conforme apresentado na Figura 3-4. São eles (IPCC, 2014):

- RCP2.6: cenário de projeção com vias de mitigação rigorosa. Projeções deste cenário implicam na manutenção das anomalias de temperatura abaixo de $2^{\circ}C$. O pico da forçante radiativa é de, aproximadamente, $3 W/m^2$ antes de 2100, e decresce para $2,6 W/m^2$ em 2100. Também conhecido como cenário otimista;
- RCP4.5: cenário de projeção estável (intermediário). Estabilização da forçante radiativa em $4,5 W/m^2$ após 2100;
- RCP6.0: cenário de projeção estável (intermediário). Estabilização da forçante radiativa em $6,0 W/m^2$ após 2100;
- RCP8.5: cenário de projeção de alta emissão de gases. Conhecido por pessimista, este cenário prevê um aumento da forçante radiativa, atingindo $8,5 W/m^2$ em 2100.

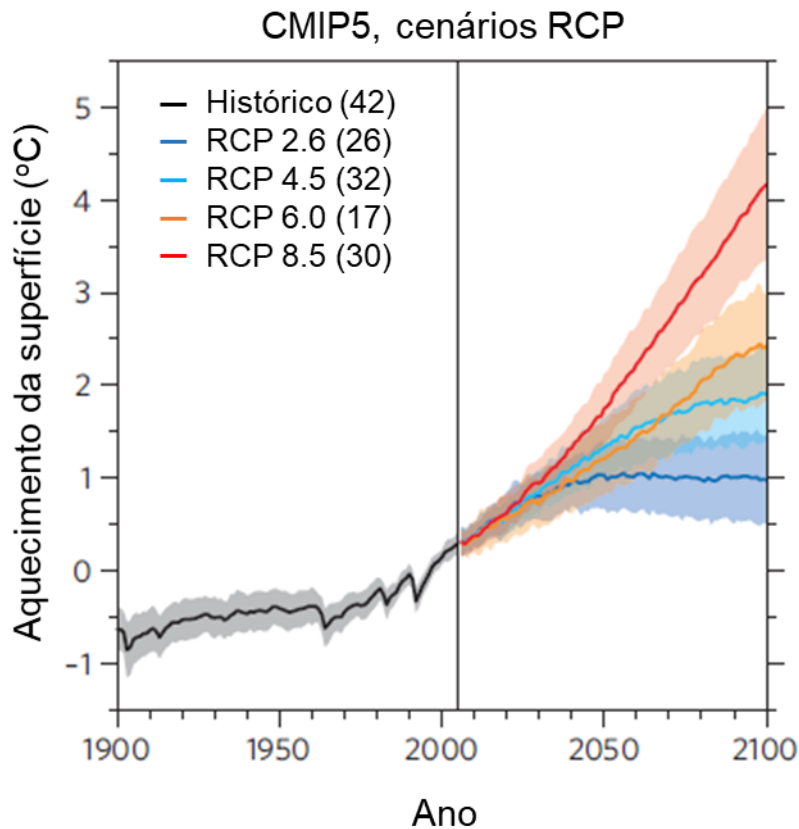


Figura 3-4. Variação da temperatura global para diferentes RCPs e incertezas. Fonte: adaptado de KNUTTI; SEDLACEK (2013).

3.4.2.3 Métodos de remoção de viés e downscaling (geração de IDFs futuras)

Os modelos climáticos não conseguem representar perfeitamente as condições climáticas observadas (CHRISTENSEN *et al.*, 2008; TEUTSCHEBEIN; SEIBERT, 2012). A remoção de viés é o ajuste estabelecido entre os dados históricos observados e os produtos obtidos pelos modelos climáticos no período de base, de modo a reduzir a transferência de erros às projeções futuras. Nesse ponto, faz-se necessário o uso de métodos de remoção/correção de viés, de modo a corrigir os dados modelados com base nos dados observados (SUNYER; MADSEN; ANG, 2012; MARAUN, 2016).

A avaliação dos modelos climáticos na representação dos eventos de precipitação observados é comumente realizada a partir da equiparação das séries de dados (ou quantis) para o mesmo período; entretanto, alguns ajustes podem ser realizados para adoção de período observado ou histórico, chamado período de base. É comum a adoção de um período de 30 anos como período de referência para a

remoção de viés dos dados oriundos dos modelos climáticos (DOSIO; PARUOLO; ROJAS, 2012; KIM; KNOW; HAN, 2015).

Existem diversos métodos para correção de viés. Em especial para a atualização de IDF's futuras, métodos de *downscaling estatístico* são aplicados, dadas as escalas temporais aplicadas para essa finalidade. *Delta change* e *quantile-mapping* (CANNON; SOBIE; MURDOCK, 2015; FANG *et al.*, 2015) são alguns métodos de correção de viés geralmente adotados.

O método do *Delta Change* (DC) é baseado no cálculo de anomalias entre os valores estimados pelos modelos climáticos no período atual e no período futuro. O valor da anomalia é posteriormente utilizado para perturbar a série observada da variável no período atual, gerando a série corrigida a ser utilizada nos períodos futuros. Tal procedimento é usualmente adotado em análises de impacto das mudanças climáticas de variáveis hidrológicas em geral (GRAHAM; ANDRÉASSON; CARLSSON, 2007; ANANDHI *et al.*, 2011; ARSISO; TSIDU; STOFFBERG, 2018).

O *quantile-mapping* (QM) é um método de correção de viés não paramétrico que ajusta os dados com base na comparação das funções cumulativas de probabilidade, para variáveis observadas e projetadas (período base e futuro) (CANNON; SOBIE; MURDOCK, 2015). Um quantil para distribuição dos dados dos modelos climáticos é corrigido pelo mesmo quantil da distribuição dos dados observados, considerando período de base (MARAUN, 2016). Esse método tem sido largamente utilizado dado seu alto desempenho em se tratando de eventos extremos (THEMEßL; GOBIET; HEINRICH, 2012), focando no uso de quantis ao invés de séries temporais e reduzindo a propagação de erros (HASSANZADEH *et al.*, 2019).

Apesar de úteis na correção dos produtos dos modelos climáticos, os métodos propostos na literatura não são universalmente aceitos para diferentes propósitos. Além disso, esses métodos negligenciam o comportamento não-estacionário das variáveis climáticas no tempo. Enquanto o método DC re replica o fator de mudança no presente para o futuro, o uso direto do método QM assume que a relação entre os produtos observados e obtidos por GCM/RCM permanecerá no futuro (SRIVASTAV; SCHARDONG; SIMONOVIC, 2014).

De modo a vencer o problema de não-estacionariedade, Li, Sheffield e Wood (2010) propuseram o método *Equidistant CDF Matching method* (EDCDFm), baseado no QM. O método EDCDFm foi desenvolvido originalmente para correção de viés de

dados de precipitação mensal. Comparado ao QM, o EDCDFm incorpora e ajusta a distribuição dos dados projetados com base na diferença entre as distribuições dos dados observados e do modelo para o período de base. Contudo, em se tratando de eventos intensos, a método EDCDFm proposto por Li, Sheffield e Wood (2010) pode não garantir que as séries corrigidas possuam valor positivo e, por essa razão, outras metodologias surgiram como o *Equiratio Quantile Mapping* (WANG; CHEN, 2013), e o *Equidistance Quantile Mapping – EQM* (SRIVASTAV; SCHARDONG; SIMONOVIC, 2014). Essas metodologias acrescentam um fator multiplicador ao invés de adotar um fator aditivo como Li, Sheffield e Wood (2010).

3.4.2.4 Estudos de impactos de mudanças climáticas em relações IDF desenvolvidos

Embora haja incertezas relacionadas às simulações do clima, cenários de emissão e métodos de estimativa de impactos, defende-se a importância de entendimento das diferentes possibilidades para as estimativas de eventos intensos, permitindo que estratégias de adaptação sejam construídas a tempo hábil em minimizar os impactos decorrentes da mudança do clima.

Diversos estudos foram conduzidos para prover informações relacionadas às precipitações intensas e seus impactos no futuro. Espera-se, até o fim deste século, um aumento na precipitação e, mais importante, na frequência de chuvas intensas (BAO *et al.*, 2017; PREIN *et al.*, 2017). Segundo Willems (2013), em análise das precipitações intensas em Uccle, Bélgica, é esperado um aumento de até 50% na intensidade de precipitação de tempo de retorno de mudanças nas IDFs de tempo de retorno de 10 anos. Em frequência de ocorrência, eventos de tempo de retorno de 20 anos tendem a ocorrer em maior frequência, alcançando tempo de retorno de 5 anos, até o fim do século 21.

Srivastav, Schardong e Simonovic (2014) avaliaram incremento na precipitação sob efeito de mudanças climáticas em quatro estações do Canadá. Os autores reportaram aumento variando entre 11,62% (cenário RCP2.6) e 53,96% (cenário RCP8.5) para precipitação de duração 1 h e TR de 2 anos. Maiores incrementos foram verificados para TR igual a 25 anos (máximo de 67%).

Tendências de aumento das precipitações intensas observadas também são indicadas na República Tcheca, Dinamarca, Suécia, entre outros países da Europa;

para projeções climáticas no futuro o comportamento é consistente ao período observado (MADSEN *et al.*, 2014).

DeGaetano e Castellano (2017) reportaram um aumento de até 30% nas precipitações intensas para o final do século na cidade de Nova Iorque. Até 2050, espera-se que os sistemas de infraestrutura de drenagem urbana de 43 estados dos Estados Unidos entrem em colapso, devido às mudanças climáticas (LOPEZ-CANTU; SAMARAS, 2018).

Em São Paulo, Brasil, os resultados de Schardong, Srivastav e Simonovic (2014) indicaram aumento de 4,5% e mais de 30%, para tempos de retorno pequenos e cenário otimista, e tempos de retorno maiores e cenário pessimista, respectivamente.

Em Hanoi, Vietnã, Vu *et al.* (2017) reportaram incremento médio na precipitação de, aproximadamente, 44%, para duração de 1 h e tempos de retorno entre 10 e 200 anos.

Contrariamente aos locais mencionados, em Auburn, no estado do Alabama nos Estados Unidos, Mirhosseini *et al.* (2013) as precipitações só aumentam para durações acima de 4 h, decrescendo para durações inferiores, comportamento causado pelas incertezas atribuídas aos modelos utilizados. Esse comportamento é semelhante aos resultados encontrados por Sabóia *et al.* (2017), para a cidade de Fortaleza, no nordeste brasileiro.

Em análise aos impactos das mudanças climáticas nas curvas IDF no município mais chuvoso da Turquia, Sen e Kahya (2021) reportaram que os resultados de precipitações intensas futuras provenientes do cenário intermediário de emissão (RCP 4.5) se mostraram superiores àqueles produzidos para o pior cenário (RCP 8.5). Ainda, os autores relataram que os estudos desta natureza são predominantes no Hemisfério Norte, com poucos estudos na América do Sul e África.

A partir das informações decorrentes dos diversos trabalhos mencionados, observa-se que, de maneira geral, as projeções climáticas advindas dos modelos climáticos indicam um aumento mais evidente em latitudes altas, ao passo que apresentam menor evidência para latitudes baixas. De fato, o 5º relatório do IPCC (AR5) indica que é esperado, com confiabilidade, que precipitações extremas sejam mais intensas e mais frequentes na maioria das regiões do planeta (SENEVIRATNE

et al., 2012); ainda, os resultados divulgados aqui pelos diversos estudos vão de encontro aos apresentados no AR5, embora com maior ou menor confiabilidade.

Embora ainda haja diversas incertezas associadas à geração de IDFs futuras, a avaliação do efeito das mudanças climáticas ainda é uma técnica importante para quantificar os impactos e direcionar ações de planejamento e estratégias de tomadas de decisão. A adoção de modelos de alta-resolução, de conjuntos de modelos e de técnicas robustas são algumas das preferências geralmente observadas na literatura na redução das incertezas associadas (GANGULI; COULIBALI, 2017; HASSANZADEH *et al.*, 2019; COOK; MCGINNIS; SAMARAS, 2020).

3.4.3 Não-estacionariedade e Projeções Climáticas

Apesar dos avanços em melhorias às metodologias de adaptação de IDFs futuras considerando mudanças climáticas, algumas pesquisas recentes têm direcionado esforços no entendimento e consideração de modelagem não-estacionária em IDFs futuras (GANGULI; COULIBALY, 2019). Utilizando a metodologia de geração de séries de precipitações máximas anuais futuras proposta por Wang e Chen (2013), Ganguli e Coulibaly (2019) introduziram tendência linear ao parâmetro de posição da distribuição de GEV. Os resultados obtidos indicaram diferenças significativas mais expressivas sob a condição não-estacionária do que sob a condição estacionária.

Nota-se que diversas abordagens não-estacionárias na construção de IDFs no período histórico/presente foram reportados na literatura (ver item 3.4.1), e recentemente foram considerados na construção de IDFs no período futuro (GANGULI; COULIBALY, 2019). Entretanto, o estudo de Ganguli e Coulibaly (2019) ignora efeitos de não-estacionariedade que porventura possam estar presentes na geração de IDFs futuras.

De modo a introduzir os efeitos de possível não-estacionariedade nos períodos histórico e futuro, Silva *et al.* (2021b) revisaram o método EQM de Schardong *et al.* (2018) e desenvolveram, no âmbito da presente tese de Doutorado, o EQM_{NS}. Em Silva *et al.* (2021c), este método foi aplicado e analisado em locais em diferentes zonas climáticas do Canadá. Este método será mais bem detalhado na seção de Materiais e Métodos.

4 PANORAMA BRASILEIRO SOBRE DRENAGEM E MANEJO DE ÁGUAS PLUVIAIS E MUDANÇAS CLIMÁTICAS

4.1 Urbanização e Sistemas de Drenagem Urbana

Drenagem e manejo de águas pluviais constituem um serviço essencial à qualidade da vida no ambiente urbano. Países desenvolvidos estão movendo-se para uma abordagem integrada, adaptada e inteligente (NICKEL, 2018), em que os serviços públicos são dimensionados mutuamente seguindo conceitos sustentáveis (BARBOSA *et al.*, 2012). Por outro lado, países em desenvolvimento estão gradualmente introduzindo práticas sustentáveis, e o sistema de drenagem ainda tem sido planejado em termos higienistas e conceitos hidráulicos (MARLOW *et al.*, 2013).

Historicamente, os caminhos da água no espaço urbano têm seguido o traçado urbano, principalmente devido às modificações de uso e ocupação do solo, e no Brasil não é diferente. De acordo com IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), o Brasil possui 84% da sua população vivendo em áreas urbanizadas, e com tendência de crescimento (IBGE, 2010) (Figura 4-1). O Brasil soma 17 cidades com mais de um milhão de habitantes (Brasil, 2016a), apresentando ainda problemas socioambientais associados ao desenvolvimento urbano inadequado. Projeções da Organização das Nações Unidas (2018), inclusive, indicam que, em 2050, a população urbana no Brasil será de 94% (Figura 4-2). Essa porcentagem demonstra a necessidade de ações e planejamento de controle do escoamento superficial. Atualmente, o Brasil está em fase de transição entre as práticas higienistas e sustentáveis, apesar da última estar apenas começando e ainda concentrar-se em discussões acadêmicas, principalmente.

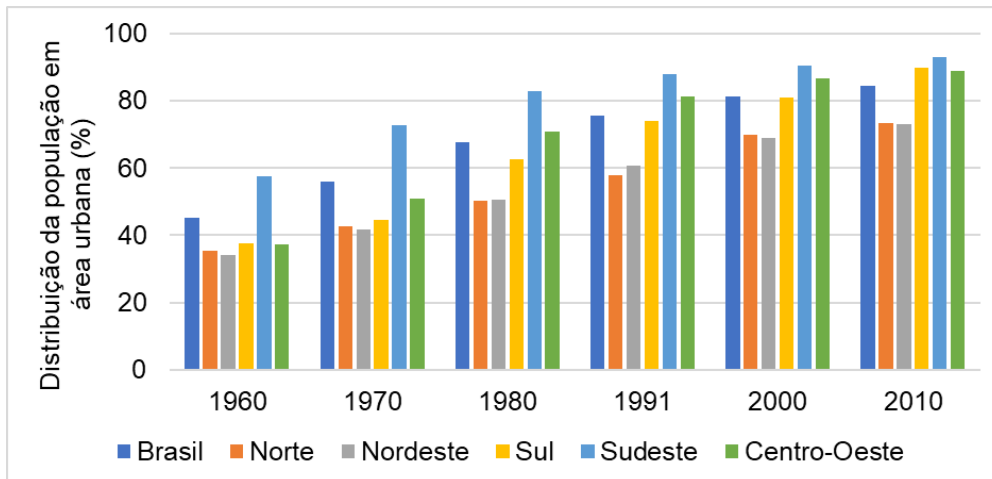


Figura 4-1. Porção da população em áreas urbanas, por região do Brasil. Fonte: IBGE (2010).

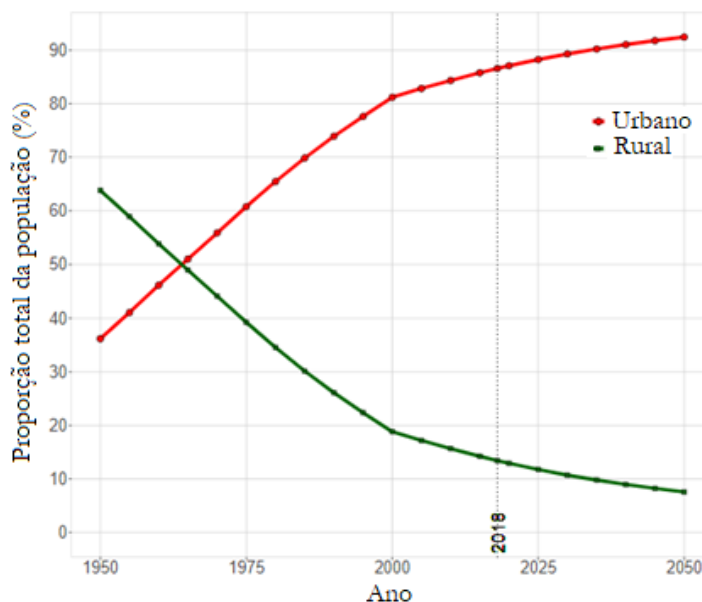


Figura 4-2. Projeção futura da porcentagem da população urbana no Brasil. Fonte: Organização das Nações Unidas (2022).

No cenário brasileiro, 2.065 municípios brasileiros tiveram ocorrência de alagamentos entre 2008 e 2012, segundo o IBGE. Desse número, 62% dos municípios estão localizados nas regiões Sudeste e Sul do Brasil (IBGE, 2014).

Dados mais recentes do Perfil dos Municípios Brasileiros, MUNIC 2017 (IBGE, 2018) apresentam que, de 2013 a 2016, este número foi de 1.729 municípios. Para inundações, foram 1.515 municípios. Do total de municípios brasileiros com mais de 500 mil habitantes, 93% desses foram atingidos por alagamentos. Municípios com ações para minimizar danos por inundações chegam a 62%, estando localizados nas regiões Sul e Sudeste. As estatísticas explanadas indicam que, apesar da introdução

de ações preventivas, a redução de alagamentos e inundações, em números, ainda é pequena, demonstrando limitações do sistema de drenagem.

Entre 1995 e 2004, danos e perdas associadas a desastres hidrológicos somaram R\$ 72,3 bilhões (UFSC, 2016) no Brasil, enquanto os investimentos para prevenção, monitoramento de eventos extremos e medidas de controle totalizaram R\$ 147,7 milhões para o mesmo período (LIBERATO, 2016). O modelo antigo de planejamento associado à falta de investimentos tem causado danos também em cidades de pequeno e médio porte, como Sorocaba e Ilha Bela, ambas no estado de São Paulo (SIMÕES *et al.*, 2017; G1 SOROCABA E JUNDIAÍ, 2019). Mesmo em países desenvolvidos, em que há adequado financiamento, inundações continuam a causar danos extensos, indicando agilidade na mudança de estratégias de manejo de águas pluviais.

Problemas técnicos de sistemas de drenagem urbana, eventos hidrológicos extremos e o excesso de escoamento no Brasil são fortemente reportados na literatura (TUCCI, 2008; MARTINS, 2015; DEBORTOLI, 2017), bem como algumas alternativas para controle de escoamento (CANHOLI, 2015; ZANANDREA; SILVEIRA, 2018; DE MACEDO *et al.*, 2019). Déficit institucional, como a falta de capacidade técnica e de gerenciamento, lacunas entre os setores públicos, descontinuidade administrativa, ausência de planejamento de longo prazo, a falta de recursos e financiamento, e a ausência de instrumentos reguladores desafiam a gestão eficiente do sistema de drenagem urbana. Alguns avanços foram observados ao longo dos anos, principalmente com a produção de instrumentos de planejamento e gestão, a exemplo de Planos Diretores de Drenagem Urbana (IPH, 2005; 2018; SÃO PAULO, 2012; ADASA, 2018).

4.2 Tópicos de Adaptação à Mudança Climática e Sistemas de Drenagem Urbana

O reconhecimento das mudanças do clima direciona estratégias de modo a reduzir suas fontes e fomentar a adaptação dos sistemas. No Brasil, esse problema foi oficialmente reconhecido em 2009, com a Política Nacional de Mudança do Clima (PNMC) – Lei No. 12.187 (BRASIL, 2009), cujo conteúdo foi reproduzido por políticas estaduais, a exemplo do da Política Estadual do Clima de São Paulo (SÃO PAULO, 2009). Tais instrumentos legais, entretanto, apenas contemplavam ações de

mitigação, como incentivo ao uso de energia limpa e ações que reduzam o desmatamento.

Para estimar os impactos da mudança do clima e avaliar medidas adaptativas, o estudo Brasil 2040 (BRASIL, 2015) foi realizado, por encomenda da Secretaria de Assuntos Estratégicos da Presidência da República. O relatório foi produzido para um melhor entendimento e prognóstico de como a mudança do clima irá influenciar diferentes setores, como recursos hídricos, agricultura, energia, infraestrutura urbana, infraestrutura costeira e transporte, até o horizonte de 2040, sugerindo estratégias de adaptação para tal.

Após o estudo Brasil 2040, e somente em 2016, estratégias de adaptação foram contempladas com o Plano Nacional de Adaptação às Mudanças do Clima (PNAMC) – No. 150 (BRASIL, 2016a), incluindo sistemas de drenagem urbana. A referida portaria visa promover o incentivo a medidas de adaptação em 11 setores estratégicos com potencial vulnerabilidade a mudanças climáticas. No caso da drenagem urbana e manejo de águas pluviais, estes se incluem em dois setores: Cidades e Infraestrutura (BRASIL, 2016b). Em análise ao setor Cidades, o PNAMC se refere aos desafios para planejamento das cidades e integração de elementos urbanos, bem como adoção de ações de controle do escoamento e medidas de adaptação baseada no ecossistema (*Ecosystem-based Adaptation – EbA*). Para o setor Infraestrutura, ações similares são mencionadas, embora com maior foco na mobilidade urbana. Em 2017, a primeira avaliação do relatório do PNAMC indicou que, desde a sua implementação, aparentemente nada foi feito. Contudo, por se tratar de um sistema de abrangência municipal, em sua grande maioria, a infraestrutura de drenagem é de responsabilidade municipal.

Em relação à produção científica, diversos estudos relacionados à avaliação de mudanças climáticas no território brasileiro foram realizados. Contudo, a maioria das produções é frequentemente associada à disponibilidade hídrica e inundações de grandes bacias (BORGES DE AMORIM; CHAFFE, 2019), biomas (DE OLIVEIRA *et al.*, 2019), agricultura (MIGUEL AYALA *et al.*, 2016), balanço hídrico (BRÊDA, 2021) e hidroeletricidade (LIMA; COLLISCHONN; MARENGO, 2014; DE JONG *et al.*, 2018). Poucos trabalhos abordaram áreas urbanas, como o de Silva *et al.* (2021a), e especificamente à alagamentos e inundações urbanas, como Marengo *et al.* (2013), Sabóia *et al.* (2017) e Silva *et al.* (2018). A região metropolitana de São Paulo, por

exemplo, é a mais investigada (SCHARDONG *et al.*, 2014; DI GIULIO *et al.*, 2018; SILVA *et al.*, 2018).

De modo a quantificar os impactos das mudanças climáticas considerando os cenários do CMIP5, o modelo Eta/CPTEC foi desenvolvido no Brasil. Este modelo foi originalmente desenvolvido pela Universidade de Belgrado em conjunto com o Instituto de Hidrometeorologia da Iugoslávia (BLACK, 1994), e é disponibilizado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) desde 1996. Atualmente o modelo Eta disponibiliza projeções climáticas de RCP 4.5 e RCP 8.5 até 2099. A resolução espacial do modelo inclui grades de 20 km para toda a América do Sul e de 5 km para o Sudeste brasileiro (CHOU *et al.*, 2014a; 2014b; LYRA *et al.*, 2017).

4.3 Desafios para Adaptação Climática e Sistemas de Drenagem Urbana no Brasil

A busca por soluções que aumentem a resiliência das cidades em relação aos impactos das mudanças do clima é complexa pois requer iniciativa local e governança. Adaptação à mudança climática é ainda um desafio ao Brasil, de modo que seu entendimento é essencial à sua superação. Um resumo desses desafios é apresentado na Tabela 4-1, identificados em razão aos elementos de adaptação climática urbana apontados em Bulkeley (2010) e Moser e Ekstrom (2010).

O relatório Brasil 2040 apresenta um prognóstico dos impactos das mudanças climáticas e estratégias de adaptação em grandes cidades, incluindo metodologias para alcançá-las (BRASIL, 2015). Nesse sentido, alcançar adaptação é possível com a quantificação de impactos das mudanças do clima no futuro e a interação entre tomadores de decisão e a comunidade científica. Primeiro, a quantificação dos impactos da mudança climática sugere que dados de precipitação estejam disponíveis no período presente e exista para uma boa cobertura e monitoramento da precipitação para prover adequado entendimento dos padrões locais de precipitação. No entanto, a cobertura de postos pluviométricos no Brasil ainda é incipiente e não-uniforme, possuindo maior densidade na região Sudeste (GADELHA *et al.*, 2019) e nos estados do Paraná e Ceará, limitando a acurácia para fins de estudo de avaliação dos impactos de mudanças climáticas. Dados de precipitação oriundos de sensores remotos, apesar de seu extenso uso para esse fim, não apresentam estimativas de eventos extremos em áreas pequenas com precisão adequada. Segundo, a estimativa de

impactos de mudanças do clima requer disponibilidade de produtos climáticos e conhecimento técnico que geralmente são encontrados na comunidade científica ou pessoas especializadas.

Tabela 4-1. Resumo dos desafios identificados para alcançar adaptação climática em drenagem urbana no Brasil.

Desafios	
Recursos financeiros	Nível nacional
	Nível regional ou local
Governança local	Reconhecimento
	Entendimento
	Prioridades
	Financiamento
Planejamento integrado	Planejamento das cidades
Capacidade técnica	Manejo de dados
Monitoramento	Cobertura espacial
	Resolução temporal
Disponibilidade de dados de clima	Produção
	Transferência de informação
	Habilidade
Incertezas	Modelagem hidrológica
	Cenários de mudanças do clima
Informação científica na tomada de decisões	Transferência de dados
Percepção social	Reconhecimento

Conforme mencionado no item 4.2, o Brasil já possui projeções climáticas de boa resolução para todo o país. Entretanto, alguma capacitação é necessária para o uso dos produtos climáticos. Segundo Bulkeley (2010), a ausência de conhecimento acerca do uso de produtos climáticos é um desafio institucional, dada a lacuna existente entre quem produz a informação e quem de fato irá utilizá-la.

Em se tratando do contexto local (municipal), recursos financeiros são essenciais ao atendimento às necessidades desde o planejamento à gestão dos sistemas de drenagem urbana. Prefeituras municipais tem a responsabilidade no planejamento e gestão da infraestrutura de drenagem, como parte do Plano Municipal de Saneamento Básico (BRASIL, 2007). O sistema de drenagem urbana pode ainda ser subsidiado por um Plano Diretor de Drenagem Urbana (PDDrU), apesar de somente 19,6% dos municípios brasileiros terem declarado possuir esse instrumento de planejamento ao Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento – Águas Pluviais (SNIS-AP) em 2017 (BRASIL, 2019). O PDDrU é um instrumento que deve

estar em consonância com o Plano Diretor Municipal, além de promover medidas sustentáveis e de controle, melhorando a capacidade do sistema e reduzindo sua vulnerabilidade.

A governança local é um desafio profundo à adaptação climática, principalmente devido à falta de percepção da mudança do clima pela sociedade. O não-reconhecimento dos potenciais riscos causados pela mudança do clima limita a implementação da adaptação e seu sucesso, uma vez que os riscos não são vistos como urgentes (DOHERTY *et al.*, 2016; SIMÕES *et al.*, 2017). De fato, algumas razões podem ser listadas: (i) em áreas urbanas, o modo como a urbanização se desenvolve, e com ela a impermeabilização, ainda é o principal fator de aumento do escoamento, mascarando os impactos das mudanças climáticas sobre a precipitação e consequente geração de escoamento; e (ii) a baixa percepção de mudança dos eventos intensos de precipitação. Apesar disso, já existe um reconhecimento e percepção, principalmente nas regiões Sudeste e Nordeste do Brasil, comumente relacionada a períodos de cheias e secas.

Outro desafio a ser mencionado corresponde a conclusão dos projetos municipais. Uma vez que as administrações municipais são limitadas a até 08 anos, no máximo, o fim deste período pode frear a conclusão de projetos locais, especialmente quando adaptação climática não for entendida como prioridade. Ainda, as cidades têm diversas necessidades, comuns a países em desenvolvimento, fazendo com que as demandas relacionadas à adaptação ao clima sejam postas ao fim da lista de prioridades (DE OLIVEIRA *et al.*, 2009; SIMÕES *et al.*, 2017). Enquanto estratégias de adaptação não forem requeridas por autoridades nacionais aos municípios, não serão vistas como prioridade (LEHMANN *et al.*, 2015). Mesmo com reconhecimento sobre mudança do clima, a ausência de investigação a nível local facilmente reduz a prioridade do problema.

Tomadores de decisão têm dificuldades de entendimento quanto aos efeitos de longo prazo das mudanças do clima, isso porque os custos relacionados à adaptação se impõem ao presente e os benefícios nem sempre são tangíveis ou só ocorrerão no futuro (AGUIAR *et al.*, 2018). Lehmann *et al.* (2015) mencionam que em alguns locais da América Latina, moradores ainda não têm acesso a informações a respeito da mudança do clima e seus impactos, e ainda existe confusão entre os termos como tempo e clima ou mitigação e adaptação.

Investimentos em drenagem urbana incluem concepção da rede, execução e manutenção. Atualmente, a aprovação e construção de projetos de drenagem são financiados pelo Governo Federal no Brasil, enquanto financiamento para melhorias e manutenção são de responsabilidade de governos locais. Diferentemente dos demais elementos do saneamento, os serviços de drenagem municipal não possuem arrecadação direta, traduzindo-se como um desafio à adaptação climática. No Brasil, os serviços de drenagem são geralmente financiados pelo Imposto Predial e Território Urbano (IPTU), como parte da receita municipal. Em todo o país, apenas o município de Santo André, no estado de São Paulo, implementou uma taxa de drenagem urbana, em 1998, que foi suspensa em 2012 por ser considerada ilegal (TASCA *et al.*, 2017). Recursos financeiros limitados combinados com o fato de que a mudança climática não tem alta prioridade tem contribuído para a ausência de adaptação climática (DI GIULIO *et al.*, 2018).

4.4 Oportunidades para Adaptação Climática e Sistemas de Drenagem Urbana no Brasil

Conforme listado por Moser e Ekstrom (2010), liderança, pensamento estratégico, capacidade, criatividade, colaboração e comunicação assertiva são elementos necessários na superação dos desafios. Em suma, estes elementos podem ser mesclados e apresentados em duas vertentes: institucional e técnica.

4.4.1 Institucional

A política brasileira ainda está iniciando no que tange a mudança do clima e adaptação. No caso da drenagem urbana, tais questões podem ser introduzidas nas agendas locais. Segundo Castello (2001), PNMC deveria requerer que os municípios insiram a mudança do clima em Planos Diretores Municipais e apresentem diretrizes que guiem os munícipes. Quando houver no município, o PDDrU também se apresenta como instrumento apropriado para tal finalidade.

O estudo Brasil 2040 sugere adoção de estratégias EbA para adaptação climática. Essa estratégia foi inicialmente aplicada na Europa, entretanto, a automática reaplicação ao Brasil não implica em eficácia, uma vez que as características locais, como tipo de solo, uso de solo e padrões de precipitação variam localmente. Ainda em acordo ao Brasil 2040, o país possui capacidade técnica e informação climática

disponível. Neste sentido, apresenta-se como oportunidade a produção de diretrizes gerais, por parte das autoridades nacionais, que condicionem autoridades locais na tomada de decisões. Planos de Ação nessa linha já têm sido adotados em países como a China (NG; REN, 2017) e Reino Unido (DEFRA, 2011). Ainda, uma vez que há capacidade técnica da comunidade acadêmica, parceria entre entidades e governos locais podem ser promissores, desde que haja agências financiadoras ao desenvolvimento de pesquisas.

De modo a prover recursos financeiros que garantam os serviços de drenagem urbana, enfatiza-se a necessidade de cobranças diretas referentes ao serviço, assim como para os demais elementos do saneamento (GOMES *et al.*, 2008; SILVEIRA *et al.*, 2009).

4.4.2 Técnica

O risco associado a projetos de drenagem provém da análise de frequência de eventos extremos locais. Esse risco é estimado com base em condições climáticas do passado, que podem não ser adequadas ao presente e futuro (BERGGREN, 2008). Então, considerando que haverá um aumento na precipitação, a rede de drenagem deve estar adaptada para manutenção do nível do serviço (ARNBJERG-NIELSEN; FLEISCHER, 2009).

Drenagem urbana sustentável e soluções EbA são apresentadas no PNAMC como medidas de redução de risco. Na verdade, essas soluções já são consideradas para redução dos impactos da mudança do uso e ocupação do solo como consequência da urbanização. Entretanto, é importante mencionar que se essas medidas não forem dimensionadas para condições futuras elas podem não ser eficazes, principalmente em áreas densamente urbanizadas, conforme sugerido por Silva *et al.* (2018).

O dimensionamento de redes de drenagem é realizado a partir de uma probabilidade de falha, e medidas de adaptação não devem ser diferentes. Sendo assim, avaliar possibilidades de impacto das mudanças do clima, a exemplo da adaptação de equações IDF pode ser uma oportunidade de inclusão em projetos de drenagem. Esse processo de adaptação foi anteriormente mencionado por Gersonius (2012) e Schardong *et al.* (2018), sendo inclusive uma alternativa recomendada pela Prefeitura Municipal do Rio de Janeiro (RIO DE JANEIRO, 2016).

Qualquer técnica adotada possui suas incertezas inerentes. Mesmo havendo incertezas, tomadores de decisão devem assumir um nível custo-benefício, de modo que garanta capacidade e resiliência ao sistema, promovendo flexibilidade de lidar com as incertezas. Essas ações reduzem impactos de decisões incertas realizadas ao início do processo de adaptação que pode resultar em custos desnecessários (GERSONIUS, 2012; COOK; MCGINNIS; SAMARAS, 2020), especialmente em países em desenvolvimento, onde recursos financeiros são escassos. Neste trabalho não foram analisadas alternativas estruturais de adaptação ou relações de custo-benefício.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 Descrição Geral

O desenvolvimento do presente trabalho envolveu o estudo dos impactos das mudanças climáticas em curvas IDF sob diferentes abordagens de análise de frequência de eventos extremos de precipitação. Nesse contexto, assumiu-se que as mudanças climáticas poderão ter efeitos (positivos ou negativos) sobre as curvas IDF adotadas no momento presente, isto é, as curvas IDF no período futuro poderão estar subestimadas ou superestimadas, em comparação às curvas IDF histórico.

De acordo com a revisão bibliográfica, destacou-se a necessidade de adaptação das curvas IDF para condições futuras utilizando-se de projeções climáticas baseadas nas projeções de emissões de gases de efeito estufa. Diversos estudos vêm desenvolvendo metodologias que preenchem esta lacuna do conhecimento. Contudo, ainda existe uma variedade de incertezas associadas ao ajuste de IDFs adaptadas às condições futuras, dentre as quais se menciona a modelagem da distribuição de probabilidade estacionária, condição que não se aplica às projeções futuras do clima. Dado o curso das mudanças climáticas, a adoção de modelagem estacionária pode subestimar ou superestimar as propriedades dos eventos extremos de precipitação.

Neste estudo, propôs-se a introdução de modelagem não-estacionária na geração de IDF adaptadas às condições futuras. Para este propósito, utilizou-se a metodologia EQM_{NS}, publicada em Silva e Simonovic (2020) e Silva *et al.* (2021b) como uma atualização à EQM desenvolvida por Srivastav *et al.* (2014) e Schardong *et al.* (2018). As curvas IDF adaptadas foram analisadas sob diferentes óticas, incluindo magnitude e frequência dos eventos de precipitação ao fim do século (ano 2099).

A Figura 5-1 apresenta um fluxograma de como o presente trabalho foi desenvolvido. Trata-se de uma breve descrição cujo detalhes são apresentados nos próximos itens:

- Obtenção de precipitação no período histórico: dados observados e dados provenientes de modelos climáticos no período histórico;
- Obtenção de precipitação no período futuro: dados provenientes de modelos climáticos no período futuro;

- Processamento de dados: processamento das séries para obtenção e organização das precipitações máximas anuais, para os dados observados e dados simulados;
- Análise de desempenho dos modelos climáticos: analisa a performance dos modelos climáticos na representatividade dos eventos intensos;
- Geração de IDFs no período histórico;
- Geração de IDFs adaptadas: estima as precipitações intensas no período futuro;
- Análise de sensibilidade das estimativas de IDFs adaptadas: quantifica as variações das estimativas de IDFs adaptadas em relação ao uso individual dos modelos climáticos;
- Análise do impacto de mudanças climáticas sobre as curvas IDFs adaptadas: quantifica os efeitos das mudanças climáticas sobre as curvas IDFs adaptadas, comparando os modelos estacionário e não-estacionário;
- Análise dos intervalos de confiança associados à distribuição estatística: quantifica as incertezas associadas ao modelo estatístico na estimativa de precipitações intensas.

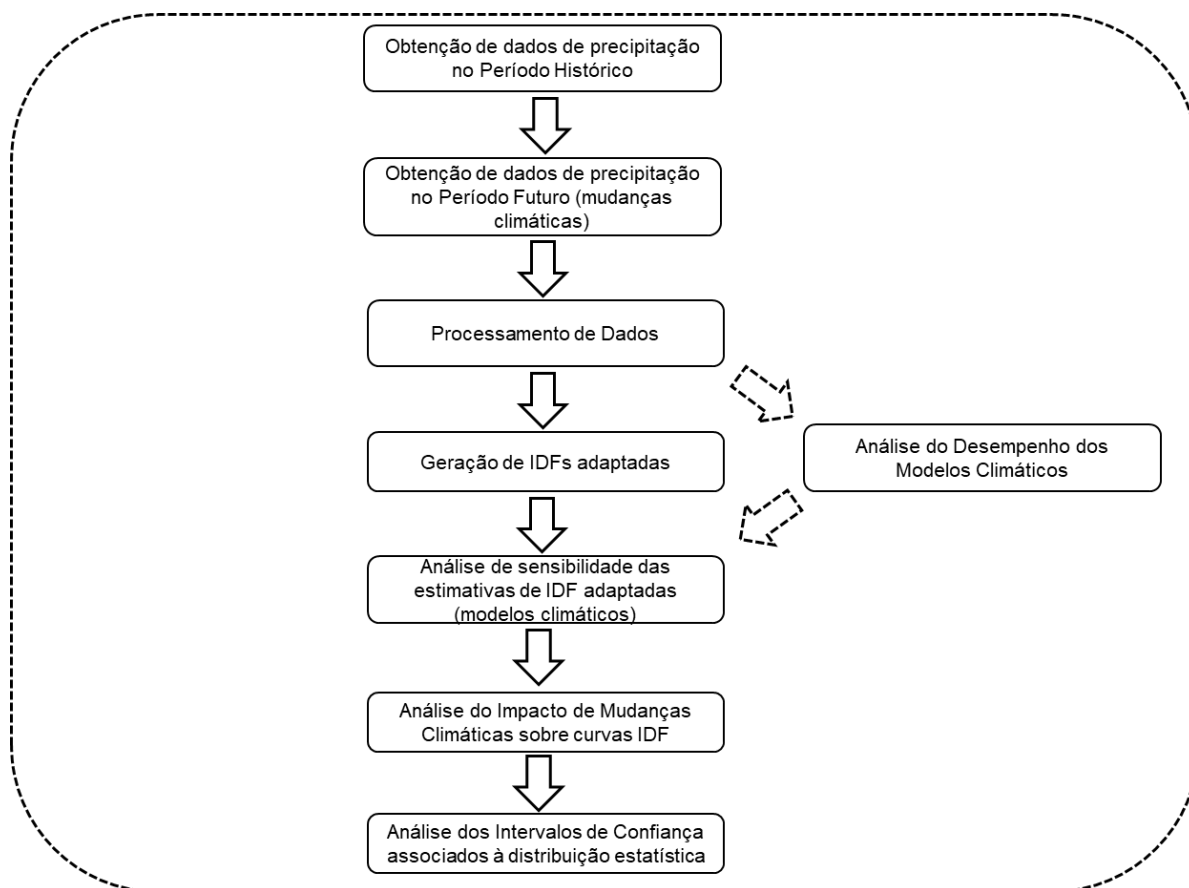


Figura 5-1. Fluxograma metodológico.

5.2 Área de estudo

A definição dos locais para análise e aplicação da metodologia foi efetuada seguindo os seguintes critérios, embora não necessariamente atendendo-os completamente e na ordem descrita:

- Estar localizada em área urbanizada, uma vez que os efeitos decorrentes de precipitações intensas tendem a impactar o maior número de pessoas em um menor espaço;
- Possuir série histórica de precipitação com qualidade e representatividade;
- Estar localizada em região do Brasil onde os efeitos das mudanças climáticas são esperados com confiabilidade, segundo indicações do AR5 do IPCC (2014).

De modo a atender os critérios definidos anteriormente, considerou-se duas áreas de estudo que atendessem pelo menos dois dos critérios definidos anteriormente: São Paulo e Porto Alegre. O fato de as áreas de estudo possuírem padrões climáticos diferentes também corroborou para a seleção desses locais.

Neste estudo, a nomeação das áreas de estudos é referida ao município em que se insere. Contudo, a caracterização climática e física não necessariamente se refere a todo o limite municipal.

Para cada área de estudo, adotou-se uma estação meteorológica, que possibilitasse a produção de IDFs nos períodos histórico e futuro. A metodologia adotada neste trabalho pode ser replicada a diferentes estações, representando condições locais.

5.2.1 Porto Alegre

A adoção de Porto Alegre como área de estudo foi corroborada no atendimento de todos os critérios previamente definidos. O município de Porto Alegre está localizado no estado do Rio Grande do Sul e possui uma população de 1.479.101 habitantes, configurando uma densidade demográfica de 2.837,53 hab/km². Além disso, município é parte da RMPA (Região Metropolitana de Porto Alegre), área mais densamente povoada do Rio Grande do Sul, com mais de 4 milhões de habitantes, 37,7% da população do Estado (IBGE, 2010).

Características climáticas à região inclui verão quente, com classificação de Köppen Cfa, clima subtropical úmido, e chuva mensal distribuída entre 100 e 170 mm (ALVARES *et al.*, 2013). Além disso, a área urbana de Porto Alegre está inserida na região SESA (*Southeastern South America* - Sudeste da América do Sul), onde tendências positivas nas precipitações já são observadas (confiança média) e tendências futuras são esperadas (baixa confiabilidade) (MAGRIN *et al.*, 2014). De fato, não foram encontrados estudos que analisassem padrões de tendências de precipitação ou outros elementos climáticos no município, com exceção de Penereiro e Meschiatti (2018), que afirmaram não haver tendência significativa associada às precipitações diárias máximas anuais.

Para representar essa área, adotou-se a estação meteorológica nacional oficial de Porto Alegre 8° DISME, códigos 03051011 (ANA) e 83967 (INMET). Localizada nas coordenadas Latitude 30°03'13" S e Longitude 51°10'24" W, no bairro Jardim Botânico (Figura 5-2), a estação 8° DISME está em operação desde 1961 e contém 40 anos de dados consistentes e disponíveis (de 1975 a 2014). Os dados obtidos junto à estação correspondem às precipitações máximas anuais para durações de 5, 10,

15, 30, 45 minutos, e 1, 2, 3, 4, 8, 14 e 24 horas, extraídos do Relatório do Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2015).

Para o posto pluviográfico mencionado, a equação IDF mais recente foi produzida por Helfer, Dornelles e Goldenfum (2017), conforme apresentada abaixo. A equação foi produzida utilizando distribuição de probabilidade Exponencial e para o mesmo período do referido documento da CPRM (2015), de 1975 a 2014.

$$I = \frac{787,388TR^{0,204}}{(td + 8,461)^{0,778}} \quad (5-1)$$

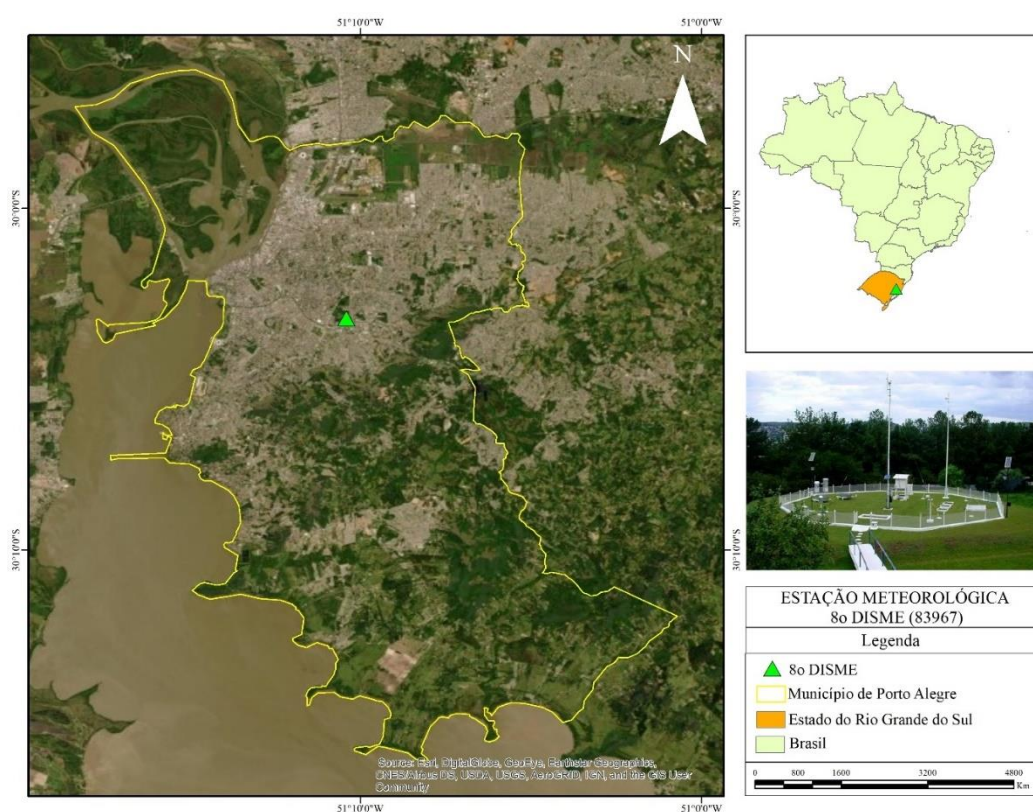


Figura 5-2. Localização da Estação Meteorológica 8º DISME, Porto Alegre – RS.

5.2.2 São Paulo

Ao contrário de Porto Alegre, São Paulo atende dois dos critérios definidos anteriormente: está localizado em área urbanizada e possui série extensa e representativa. As expectativas de mudança dos padrões de precipitação, por outro lado, ainda não possuem confiabilidade assumida pelo IPCC. O município de São Paulo está localizado no estado de São Paulo e possui uma população de 11.253.503 habitantes, configurando uma densidade demográfica de 7.398,26 hab/km². Além disso, o município é parte da RMSP (Região Metropolitana de São Paulo), área mais

densamente povoada do Brasil (IBGE, 2010), caracterizada por um rápido crescimento urbano.

O município de São Paulo está localizado no Sudeste do Brasil, e a RMSP possui uma transição climática classificada como Cwa, com período seco definido, e Af, permanentemente úmido. A RMSP possui altitude de aproximadamente 750 m acima do nível do mar, apresentando precipitação média anual entre 1.300 e 1.500 mm/ano (LIMA; RUEDA, 2018). Estudada sob diversos aspectos climáticos, análises a RMSP desde a metade da década de 1930 indicam alteração nos padrões de precipitações intensas, explicadas por fenômenos de larga escala, a exemplo do El Niño, ODP (Oscilação Decadal do Pacífico, PDO - *Pacific Decadal Oscillation Index*), e efeitos urbanos, consequência da formação das Ilhas de Calor (SILVA DIAS *et al.*, 2013; ZILI *et al.*, 2016).

A representação da RMSP foi realizada a partir da estação meteorológica IAG-USP (Instituto de Astrofísica, Geociências e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo), localizada no Parque do Estado, nas coordenadas Latitude 23°39' S e Longitude 46°38' W (Figura 5-3). A estação é operada pelo IAG-USP, sendo de grande valia para estudos climáticos na RMSP. Os dados obtidos junto ao IAG (via solicitação), compreendem o período de 1933 a 2018, com discretização horária, o que permite obter séries de precipitações máximas anuais de duração de 1 a 24 horas. Além da representatividade dos dados, a área onde a estação foi instalada era um ambiente rural, sendo capaz de representar efeitos do crescimento urbano no clima local, e vice-versa. Neste estudo, foram adotadas precipitações máximas anuais de 1, 2, 3, 4, 8, 14 e 24 horas, e o ano hidrológico foi definido como de agosto a setembro. Um total de 85 anos completos foram considerados.

Para o posto pluviográfico IAG-USP, a equação IDF mais recente identificada foi a produzida por Martinez e Piteri (2015) *apud* DAEE (2018). A referida equação foi construída utilizando série de precipitações máximas de 1933 a 2011 (66 anos completos), e é apresentada a seguir, na Equação (5-1). Outra equação popularmente utilizada é a de Martinez (1999) (Equação 5-3), inclusive mencionada no Plano Diretor de Drenagem Urbana de São Paulo (SÃO PAULO, 2012). Observa-se que tais equações possuem formulação diferente que as demais mencionadas neste trabalho.

$$I = 32,77(td + 20)^{-0,8780} + 16,10(td + 30)^{-0,9306} \left[-0,4692 - 0,8474 \ln \ln \left(\frac{TR}{TR - 1} \right) \right] \quad (5-2)$$

$$I = 39,3015(td + 20)^{-0,8780} + 10,1767(td + 20)^{-0,9306} \left[-0,4653 - 0,8407 \ln \ln \left(\frac{TR}{TR - 1} \right) \right] \quad (5-3)$$

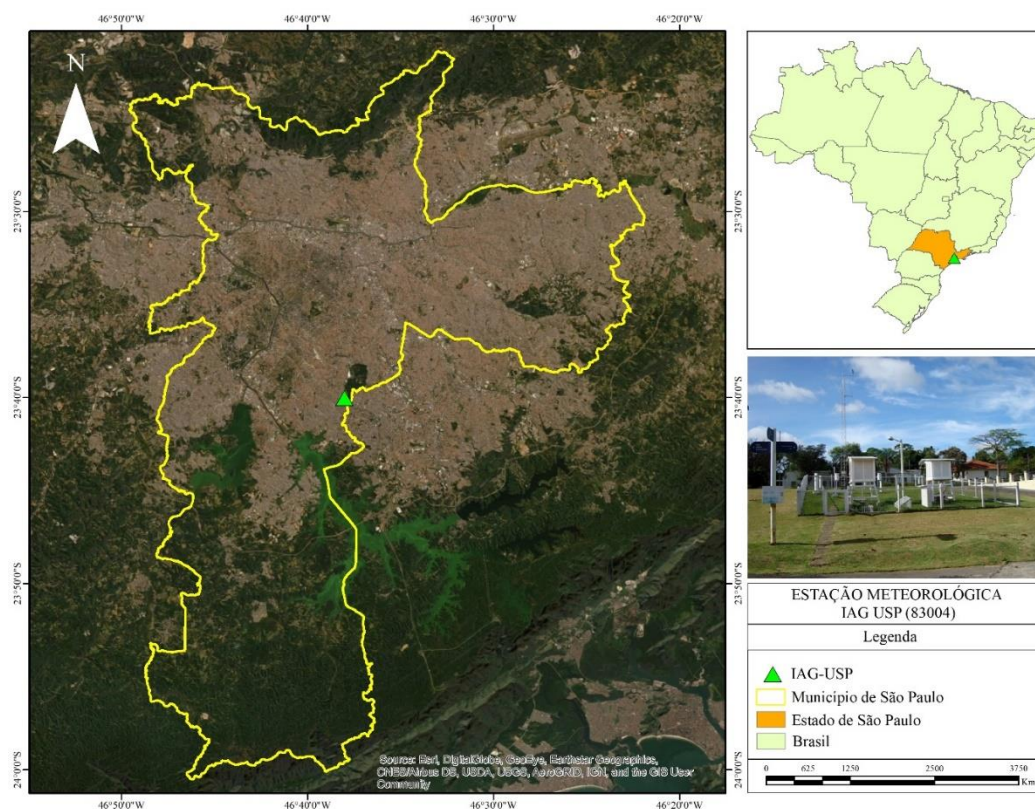


Figura 5-3. Localização da Estação Meteorológica IAG USP, São Paulo – SP.

5.3 Produtos de modelos climáticos

A produção de IDF adaptadas às condições climáticas futuras foi possível a partir do uso de produtos de precipitação provenientes de modelos climáticos. Neste trabalho, dados simulados de precipitações foram obtidos com base nos produtos do modelo climático regional Eta (CPTEC/INPE), disponibilizados na plataforma PROJETA, através do *site* <https://projeta.cptec.inpe.br/#/dashboard>² (CHOU *et al.*, 2014a; CHOU *et al.*, 2014b; BRASIL, 2016c; LYRA *et al.*, 2017). A adoção dos dados provenientes do modelo Eta é justificada por se tratar de um modelo regional que

² A obtenção dos dados do modelo Eta é realizada virtualmente. São selecionados o local e os critérios de modelo climático, resolução espacial e discretização temporal. Após a seleção, é solicitada a inserção dos dados do usuário, como nome, *e-mail* e instituição de origem. Realizado o pedido, os dados solicitados são enviados pela plataforma por *e-mail* ao usuário.

abrange o território brasileiro que, conforme descrito em Chou *et al.* (2014a; 2014b), inclui os padrões climatológicos e topografia da América do Sul.

Os dados disponíveis através do modelo regional Eta possuem resolução espacial de 20 x 20 km (todo o continente da América do Sul) e 5 x 5 km (Sudeste brasileiro). Em se tratando de modelo regional, o Eta-20km compreende os seguintes GCMs como condições de contorno: MIROC5 (WATANABE *et al.*, 2010), HADGEM2-ES (COLLINS *et al.*, 2011), CANESM2 (ARORA *et al.*, 2011) e BESM (NOBRE *et al.*, 2013). Para o modelo Eta-5km, apenas o modelo global HADGEM2-ES está disponível.

Na plataforma PROJETA são disponibilizados produtos de precipitação com resolução temporal diária e 3-horas, para o período de 1961 a 2099, e considerando dois cenários de emissão de gases de efeito estufa, RCP 4.5 e RCP 8.5. Dessa maneira, a produção de IDFs adaptadas às mudanças climáticas foi conduzida sob diferentes condições de contorno, resolução temporal, resolução espacial e cenários de emissão de gases. A Tabela 5-1 apresenta um sumário dos produtos climáticos adotados no presente trabalho.

Tabela 5-1. Resumo dos produtos climáticos utilizados para geração de IDFs adaptadas.

Área de Estudo	GCM (condição de contorno)	Resolução Espacial (km x km)	Resolução Temporal
São Paulo	BESM	20 x 20	Diária; 3-horas
	CANESM2		
	HadGEM-ES		
	MIROC5	5 x 5	
	HadGEM-ES		
	HadGEM-ES (D2)		
Porto Alegre	BESM	20 x 20	
	CANESM2		
	HadGEM-ES		
	MIROC5		

5.4 Eventos extremos de precipitação

5.4.1 Função acumulada de probabilidade

No presente trabalho, a geração de relações IDF foi realizada com base na distribuição teórica de probabilidade GEV (item 3.1). A escolha desta distribuição foi baseada no seu potencial em ajustar-se a eventos extremos, a partir de três

parâmetros: (i) posição (μ) (ii) escala (σ); e (iii) forma (ξ), sendo largamente aplicada em estudos de eventos extremos de precipitação (COLES, 2001; KATZ, 2013).

Condições não-estacionárias podem ser representadas a partir da introdução de tendências aos parâmetros de distribuição na Equação (3-1). Para tal, funções foram introduzidos em um ou dois parâmetros de GEV, associados a um covariante. Admitiu-se que os parâmetros de posição e escala eram variáveis, e o tempo (ano) foi a covariante utilizada. Em outras palavras, os parâmetros de posição e escala foram tidos como função do tempo; e em contraste, o parâmetro de forma foi mantido constante no decorrer do tempo. Tais condicionantes foram impostas em acordo aos diferentes estudos desenvolvidos. O parâmetro de forma, por exemplo, é geralmente difícil de ser estimado, e associá-lo a qualquer tendência pode ser inadequado (COLES, 2001; KATZ; PARLANGE; NAVEAU, 2002).

Neste estudo, o modelo estacionário e cinco modelos não-estacionários foram avaliados. A Tabela 5-2 apresenta os diferentes modelos utilizados e suas especificações. GEV-I corresponde ao modelo estacionário, com manutenção dos parâmetros de distribuição, enquanto de GEV-II a GEV-VI correspondem aos modelos não-estacionários, com variação dos parâmetros de posição e/ou escala em função do tempo 't', dado em anos. Aos modelos não-estacionários foram admitidas tendências do tipo linear ou exponencial. Essas funções são comumente encontradas em estudos de hidrologia e mudanças climáticas associadas a tendências (BEGUERÍA *et al.*, 2011; RAGNO *et al.*, 2018; OUARDA; YOUSEF; CHARRON, 2018).

Tabela 5-2. Lista de modelos de probabilidade de GEV ajustados aos dados.

GEV-ID	Modelo	Número de Parâmetros
I	$F(\mu; \sigma; \xi)$	3
II	$F(\mu_0 + \mu_1 t; \sigma; \xi)$	4
III	$F(\mu_0 + \mu_1 t; \sigma_0 + \sigma_1 t; \xi)$	5
IV	$F(\mu_0 + \mu_1 t; e^{(\sigma_0 + \sigma_1 t)}; \xi)$	5
V	$F(\mu; \sigma_0 + \sigma_1 t; \xi)$	4
VI	$F(\mu; e^{(\sigma_0 + \sigma_1 t)}; \xi)$	4

Diferentemente das distribuições de probabilidade que possuem dois parâmetros, estimar os parâmetros de GEV requer a solução de cálculos complexos. Neste estudo, os parâmetros da distribuição de GEV foram obtidos pelo método da Máxima Verossimilhança (MV) (COLES, 2001), uma vez que este método possui alta

eficiência computacional e pode ser facilmente estendido ao caso não-estacionário. De acordo com Katz, Parlange e Naveau. (2002), o método MV é recomendado para séries temporais de tamanho $n > 25$. A função da verossimilhança, denotada por $L(X/\mu; \sigma; \xi)$, é capaz de medir o quão próximo os valores observados se comportam como uma função teórica de GEV, de modo que as estimativas maximizam a função L . A máxima estimativa de verossimilhança define os valores dos parâmetros que maximizam a função logarítmica. Uma vez que a função logarítmica é do tipo monotônica, a função $\log L$ possui seu máximo igual a função L (COLES, 2001). Para a série de precipitações máximas anuais X , a função logarítmica da verossimilhança derivada da Equação (3-1) é dada pela Equação (5-4), para o caso estacionário.

$$\begin{aligned} \log L(X; \mu; \sigma; \xi) &= -n \log \sigma \\ &- \left(1 + \frac{1}{\xi}\right) \sum_{i=1}^n \log \left[1 + \frac{\xi(x_i - \mu)}{\sigma}\right] - \sum_{i=1}^n \left[1 + \frac{\xi(x_i - \mu)}{\sigma}\right]^{-1/\xi}, \quad (5-4) \\ &1 + \frac{\xi(x_i - \mu)}{\sigma} > 0 \end{aligned}$$

5.4.2 Avaliação dos modelos GEV

No presente trabalho, propôs-se o uso de 6 diferentes modelos de distribuição de probabilidade de GEV (Tabela 5-2). Dado o número de modelos de GEV, e considerando a variabilidade espacial que as precipitações podem apresentar, foram utilizadas métricas de desempenho para avaliar o melhor modelo a ajustar-se aos dados. Dada a complexidade associada à modelagem não-estacionária, adotou-se mais de um método para avaliação comparativa (KIM *et al.*, 2017). A avaliação dos modelos de GEV foi conduzida em três etapas: (i) o Critério de Informação Akaike (CIA); (ii) o Teste de Razão da Verossimilhança (Teste-RV); e (iii) o Coeficiente de Determinação do Gráfico Quantil-Quantil (R^2 Q-Q).

O método CIA é um método usualmente utilizado na seleção do melhor modelo GEV dentre diversos, baseando-se no valor de $\log L$ (Equação 5-4) estimado para cada modelo. Contudo, dependendo da relação entre o tamanho da amostra n e o número de parâmetros k , recomenda-se uma correção associada ao método CIA (CIAc), a menos que $n/k > 40$, reduzindo as incertezas associadas a seleção entre os modelos (BURNHAM; ANDERSON, 2004). Dentre diversos modelos com k

parâmetros ajustados a uma série de precipitações máximas anuais X de tamanho n , CIA e CIAc são expressas da seguinte forma:

$$CIA(k) = -2\log L + 2k \quad (5-5)$$

$$CIAc(k) = AIC(k) + \frac{2k(k+1)}{n-k-1} \quad (5-6)$$

De modo a facilitar a análise dos resultados de CIAc, seus valores são ordenados e subtraídos ao valor de menor CIAc, assumindo um ordenamento de Δ_i , estimado conforme Equação (5-7). O modelo cujo valor de Δ_i for igual a 0, isto é, apresentar menor CIAc, é classificado como melhor; enquanto os modelos com $\Delta_i \leq 2$ são considerados bons (BURNHAM; ANDERSON, 2004).

$$\Delta_i = CIAc_i - \text{menor}(CIAc) \quad (5-7)$$

Em que: i é o modelo de GEV.

Na sequência, a avaliação dos modelos de GEV foi realizada a partir do Teste-RV. Quando um modelo não-estacionário foi identificado como melhor modelo pelo método CIA, o Teste-RV foi utilizado para atestar sua confiabilidade estatística em produzir relações IDF em comparação ao modelo estacionário. O Teste-RV compara o ajuste de dois modelos de GEV (um estacionário e um não-estacionário), aproximando-os à distribuição Qui-Quadrado (χ^2). A estatística do Teste-RV foi calculada pela Equação (5-8):

$$D = 2[-\log L_s + \log L_{ns}] \sim \chi^2 \quad (5-8)$$

Em que: $\log L_s$ é o logaritmo da verossimilhança do modelo estacionário, e $\log L_{ns}$ é o logaritmo da verossimilhança do modelo não-estacionário.

Assumindo uma distribuição Qui-Quadrado com grau de liberdade igual à diferença entre o número de parâmetros dos modelos comparados, a significância estatística do modelo não-estacionário foi medida pelo valor-p. Neste estudo, adotou-se 95% como nível de confiança, isto é, p-valor < 0,05.

Os métodos de avaliação anteriormente mencionados avaliam o ajuste do modelo não-estacionário em relação ao modelo estacionário. Entretanto, eles não garantem a aderência do modelo adotado aos dados. Nesse sentido, utilizou-se o gráfico Quantil-Quantil, que permite verificar o ajuste da distribuição teórica perante os dados empíricos. Contudo, o gráfico Quantil-Quantil pode apresentar

interpretações subjetivas e, portanto, optou-se por adotar o coeficiente de determinação R^2 Q-Q na verificação da aderência do modelo ajustado.

Após as referidas análises, obteve-se o modelo de GEV que melhor se ajusta aos dados. Estas análises foram realizadas em ambiente *RStudio* através do pacote *extRemes*, versão 2.1-1 (GILLELAND, 2021).

5.4.3 Estimativa de eventos extremos de precipitação e curvas IDF

Definido o modelo GEV que melhor se ajusta aos dados, a estimativa de eventos extremos de precipitação foi obtida a partir da função inversa de probabilidade. A função inversa de GEV é utilizada para calcular a máxima precipitação de duração td associada a diferentes riscos associados, também conhecidos como probabilidade de excedência ou tempo de retorno TR.

A máxima precipitação de duração td para um determinado tempo de retorno TR é dada pela Equação (3-2).

Para o modelo estacionário, os parâmetros de GEV não variam com o tempo e, por esta razão, a máxima precipitação estimada se mantém constante para todo o período de análise.

Para o modelo não-estacionário, os parâmetros de posição e/ou escala variam com o tempo, em anos (ver exemplos das configurações de modelos de GEV adotadas em Tabela 5-2); logo, é possível estimar precipitação máxima para cada horizonte de tempo. Para fins deste estudo, e de modo a se obter resultados mais conservadores, adotou-se como precipitação máxima estimada para modelos não-estacionários, ao longo dos períodos de análise, aquela que correspondesse ao 95^o percentil das precipitações máximas estimadas.

Após a obtenção das precipitações máximas associadas a uma duração e período de retorno, as precipitações foram convertidas em intensidades máximas, permitindo ajustar as curvas IDF.

Existem diversas equações que ajustam as relações IDF, gerando as conhecidas curvas IDF. No Brasil, a curva IDF mais comumente ajustada é dada no formato da Equação (3-3), motivo pelo qual foi adotada neste trabalho, embora haja diferentes formulações também aplicáveis, como a apresentada na Equação (5-3).

Os coeficientes de ajuste da equação IDF foram obtidos a partir da minimização de métricas como a Raiz do Quadrado Médio do Erro (RQME) - Equação (5-9) - e o

Desvio Percentual Médio Absoluto (DPMA) - Equação (5-10) - (HELPER; DORNELLES; GOLDENFUM, 2017).

$$RQME = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (Ie_j - Ic_j)^2}{N}} \quad (5-9)$$

$$DPMA = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{|Ie_j - Ic_j|}{Ic_j} \quad (5-10)$$

em que: Ie é a intensidade média estimada pelas relações IDF; Ic é a intensidade média calculada pela curva IDF; j representa o dado comparado; e N o número total de dados comparados.

5.5 Geração de curvas IDF

Nesta etapa, são apresentadas informações e metodologias utilizadas conforme o período em que a IDF foi estimada. A devida apresentação entre os períodos permitiu a comparação entre os mesmos e quantificação dos impactos das mudanças climáticas no período futuro.

As curvas IDF ajustadas para ambas as estações foram estimadas considerando modelo de distribuição de probabilidade estacionário e não-estacionário (quando este for analisado como o melhor modelo dentre os adotados). A estimativa de curvas IDF por ambos os modelos de GEV também permitiu a comparação entre os modelos. Estimativas de parâmetros de distribuição de GEV e consequentes precipitações intensas foram obtidas via método da Máxima Verossimilhança através do pacote *extRemes 2.1-1* em ambiente RStudio (GILLELAND, 2021).

5.5.1 Período presente (IDFs históricas)

No período histórico, foram utilizados apenas dados observados das estações meteorológicas. Para as estações anteriormente mencionadas, foram obtidas as séries de precipitações máximas anuais. Para Porto Alegre, o período histórico foi de 1975 a 2014; para São Paulo, o período histórico foi de 1933 a 2018.

5.5.2 Período futuro (IDFs adaptadas às mudanças climáticas)

Para o período futuro, foram utilizados dados observados obtidos a partir das estações meteorológicas e os dados simulados, obtidos a partir de simulações do

modelo Eta. Para as estações mencionadas, foram obtidas as séries de precipitações máximas anuais simuladas de 1961 a 2099. Tanto para Porto Alegre quanto para São Paulo, o período futuro adotado foi de 2020 a 2099.

A curva IDF para o período futuro foi quantificada seguindo 2 métodos complementares: (i) O método EQM, que quantifica IDF no período futuro adotando condições estacionárias à distribuição de probabilidade, por estação pluviométrica; e (ii) o método EQM_{NS}, complementar ao EQM, quantificando futuras IDF não-estacionárias, por estação.

5.5.2.1 *Equidistance Quantile Matching (EQM)*

O método EQM foi originalmente proposto por Srivastav, Schardong e Simonovic (2014) para uso junto à distribuição de probabilidade teórica de Gumbel, direcionado à adaptação de curvas IDF sob o efeito de mudanças climáticas. Posteriormente, o EQM foi adaptado à distribuição de probabilidade teórica de GEV (SCHARDONG *et al.*, 2018). Diferentemente de outros métodos que utilizam projeções climáticas na adaptação de IDFs, o EQM baseia-se no uso direto de precipitações máximas anuais e distribuição de probabilidade associadas, reduzindo os erros associados ao uso de séries contínuas de precipitação (HASSANZADEH *et al.*, 2019; SRIVASTAV; SCHARDONG; SIMONOVIC, 2014).

A aplicação do EQM é subdividida em duas etapas:

- (i) *Downscaling* espacial, que associa as características das precipitações intensas no período histórico às precipitações máximas anuais obtidas via modelos climáticos, também no período histórico. O *downscaling* espacial se converte na transferência de características de distribuição de probabilidade obtida via observação para aquela obtida via simulação, ambos no mesmo período.
- (ii) *Downscaling* temporal, que captura as variações de distribuição de probabilidade entre os períodos histórico e futuro. Ao invés de assumir a distribuição teórica de probabilidade no período histórico ao período futuro, o *downscaling* temporal considera as mudanças estimadas entre os períodos.

O *downscaling* espacial é realizado a partir do uso da função de transferência de mapeamento de quantis, que transfere os quantis da distribuição da probabilidade

no período histórico observado à distribuição de probabilidade no período histórico simulado (SRIVASTAV; SCHARDONG; SIMONOVIC, 2014). Esta etapa corrige os dados obtidos via modelo climático em acordo com os dados observados, para o período histórico. Este processo é também conhecido como correção de viés. Usando o princípio do mapeamento de quantis, a distribuição acumulada de probabilidade do modelo climático ($F_{s,h}$) e as séries de precipitações máximas anuais observadas ($X_{j,o,h}$) são iguadas para estabelecer uma relação estatística entre as diferentes fontes e obter séries de precipitações máximas simuladas corrigidas, conforme indica a Equação (5-11), abaixo:

$$\hat{x}_{j,o,h} = F_{j,o,h}^{-1}[F_{s,h}(x_{s,h})] \quad (5-11)$$

onde: \hat{x} é precipitação máxima anual corrigida, F é a função de distribuição acumulada e F^{-1} é a função inversa. j,o,h corresponde ao dado de precipitação observado ('o') de duração sub-diária ('j') no período histórico ('h'). s,h corresponde ao dado de precipitação simulado ('s') no período histórico ('h'). Os quantis extraídos da Equação (5-11) são então iguados aos valores de $x_{s,h}$ para estabelecer uma relação funcional entre a precipitação simulada corrigida e a precipitação simulada bruta, conforme indica a Equação (5-12).

$$\hat{x}_{j,o,h} = \frac{A_j + x_{s,h}}{B_j + C_j * x_{s,h}} + \frac{D_j}{x_{s,h}} \quad (5-12)$$

onde: A_j , B_j , C_j e D_j são os coeficientes de ajuste da equação, para cada série de precipitação de duração ('j'). O ajuste da Equação (5-12) foi realizado utilizando o algoritmo de Evolução Diferencial e o Método dos Mínimos Quadrados como função-objetivo a ser minimizada. Utilizou-se o pacote *DEoptim* 2.2-6 em ambiente RStudio para otimização dos coeficientes de ajuste da equação (ARDIA *et al.*, 2021).

Na sequência, o *downscaling* temporal é realizado. O método EQM inicialmente encontra uma relação entre as séries de precipitação máximas anuais do modelo climático nos períodos histórico e futuro (para todos os RCPs), através do mapeamento de quantis conforme indica a Equação (5-13). Posteriormente, estima-se a mudança relativa entre os períodos histórico e futuro, segundo Equação (5-14). Essas etapas compreendem o chamado mapeamento de quantis delta, que permite mapear as diferenças de quantis entre os períodos.

$$\hat{x}_{s,h} = F_{s,h}^{-1}[F_{s,f}(x_{s,f})] \quad (5-13)$$

$$\Delta_s = \frac{x_{s,f}}{\hat{x}_{s,h}} \quad (5-14)$$

onde: s, f corresponde ao dado de precipitação simulado ('s') no período futuro ('f'); e Δ_s é a mudança relativa.

Aplicados os *downscaling* necessários, substituiu-se $x_{s,h}$ por $\hat{x}_{s,h}$ na Equação (5-12) e multiplicou-se por Δ_s para obter as séries de precipitações máximas futuras de diferentes durações ($x_{j,f}$), indicado na Equação (5-15):

$$x_{j,f} = \Delta_s \cdot \hat{x}_{j,o,h} \quad (5-15)$$

Obtidas as séries de precipitações máximas anuais futuras, foi possível estimar as curvas IDF futuras para os diferentes cenários RCP. No caso do uso do método EQM, as curvas IDF foram produzidas considerando apenas modelo de probabilidade estacionária, com manutenção dos parâmetros da distribuição.

Um fluxograma do método EQM é apresentado na Figura 5-4.

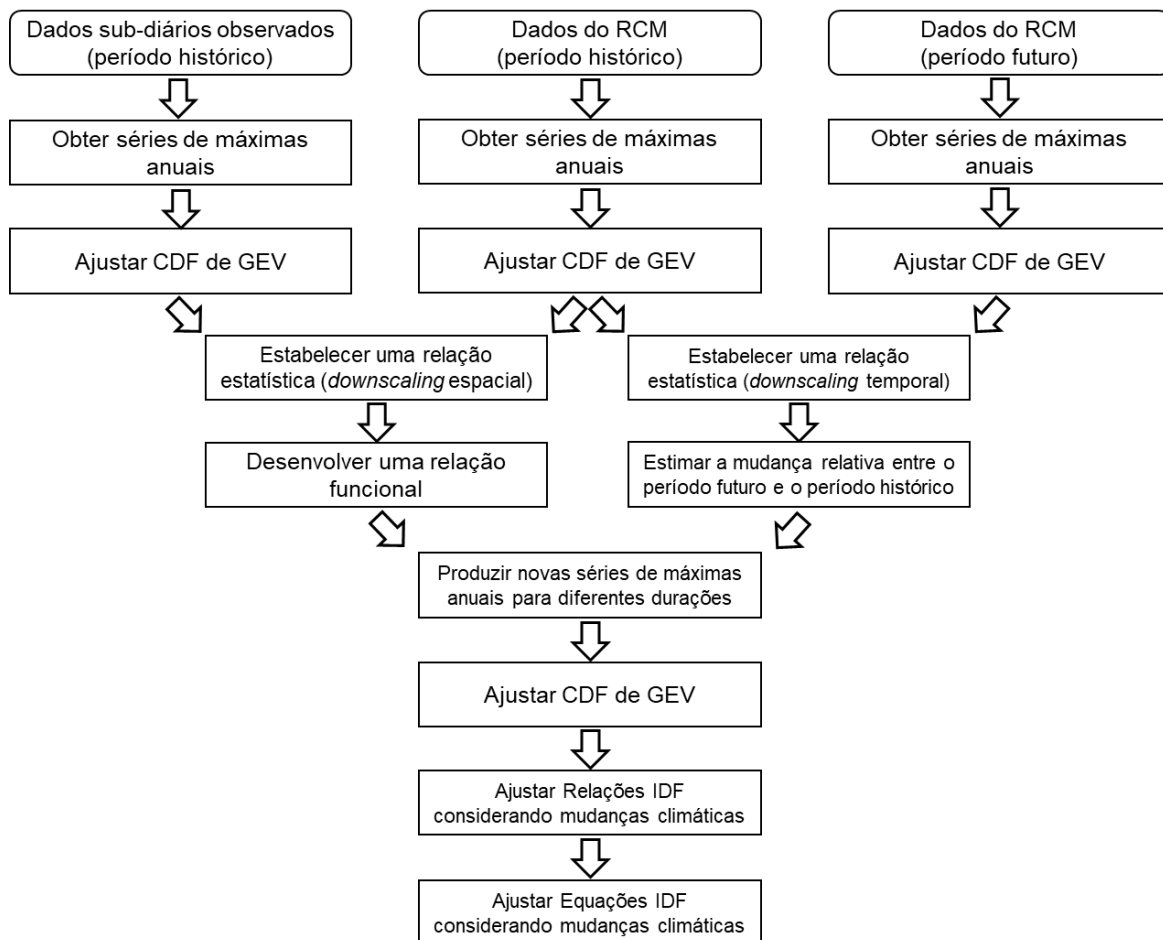


Figura 5-4. Fluxograma da metodologia de adaptação de curvas IDF sob o efeito de mudanças climáticas. Fonte: SCHARDONG et al. (2018).

5.5.2.2 Equidistance Quantile Matching Não-Estacionário (EQM_{NS})

Apesar de considerar as mudanças relativas entre os períodos histórico e futuro, considerando o *downscaling* temporal, o método EQM não considera o efeito da não-estacionariedade no ajuste das distribuições de probabilidade para posterior geração de IDF considerando o efeito das mudanças climáticas. Em consequência, apesar de considerar os efeitos das mudanças climáticas, as IDF produzidas podem subestimar ou superestimar as intensidades máximas. Dessa forma, foram realizadas modificações ao método EQM para geração de IDFs futuras não-estacionárias, denominado EQM_{NS}.

A sequência metodológica do EQM_{NS} é semelhante ao EQM, com algumas modificações que corroborem o uso de distribuição de probabilidade não-estacionária. No método EQM, o *downscaling* espacial é aplicado assumindo que não há padrão de tendência associado aos parâmetros de distribuição de probabilidade das séries de precipitações máximas anuais no período histórico, isto é, desconsidera possíveis tendências que possam estar associada às séries históricas. Diferentemente do EQM, o EQM_{NS} avalia diferentes configurações associadas aos parâmetros de distribuição de GEV (Tabela 5-2), adotando aquela que melhor se ajusta às séries, em acordo às metodologias apresentadas na Seção 5.4.2. Quando o melhor modelo ajustado às séries históricas é avaliado como não-estacionário, tem-se que um ou dois parâmetros de GEV variam com o tempo. Deste modo, e para fins deste trabalho, adotou-se como estimativa dos parâmetros variáveis o 95º percentil, de acordo com a Equação (5-16) e Equação (5-17). Tal modificação ao *downscaling* espacial assegura que os efeitos da não-estacionariedade presentes no período histórico serão considerados na geração de IDFs no período futuro.

$$\hat{\mu}_{95} = Q_{95}(\hat{\mu}_1, \hat{\mu}_2, \dots, \hat{\mu}_n) \quad (5-16)$$

$$\hat{\sigma}_{95} = Q_{95}(\hat{\sigma}_1, \hat{\sigma}_2, \dots, \hat{\sigma}_n) \quad (5-17)$$

Em relação ao *downscaling* temporal, uma vez que esta etapa contempla as mudanças relativas entre os períodos histórico e futuro, o EQM_{NS} se mantém igual ao EQM original.

Após as etapas de *downscaling*, calcula-se as séries de precipitações máximas anuais futuras de diferentes durações (Equação 5-15).

Obtidas as séries de precipitações máximas anuais futuras, é possível estimar as curvas IDF futuras para os diferentes cenários RCP. No caso do uso do método EQM_{NS}, realizou-se uma vez a mais a avaliação das diversas configurações associadas aos parâmetros de distribuição de GEV, adotando-se aquela de melhor ajuste aos dados. Uma vez que o melhor modelo de GEV ajustado é não-estacionário, estimou-se o 95º percentil dos parâmetros variáveis, utilizando-os para estimar os eventos intensos de precipitação para os diversos tempos de retorno. Quando o melhor modelo de GEV ajustado é estacionário, os parâmetros da distribuição são utilizados diretamente na estimativa dos eventos intensos.

Ao fim, as curvas IDF são ajustadas utilizando-se a Equação (3-3). Um fluxograma do modelo EQM_{NS} é apresentado na Figura 5-5.

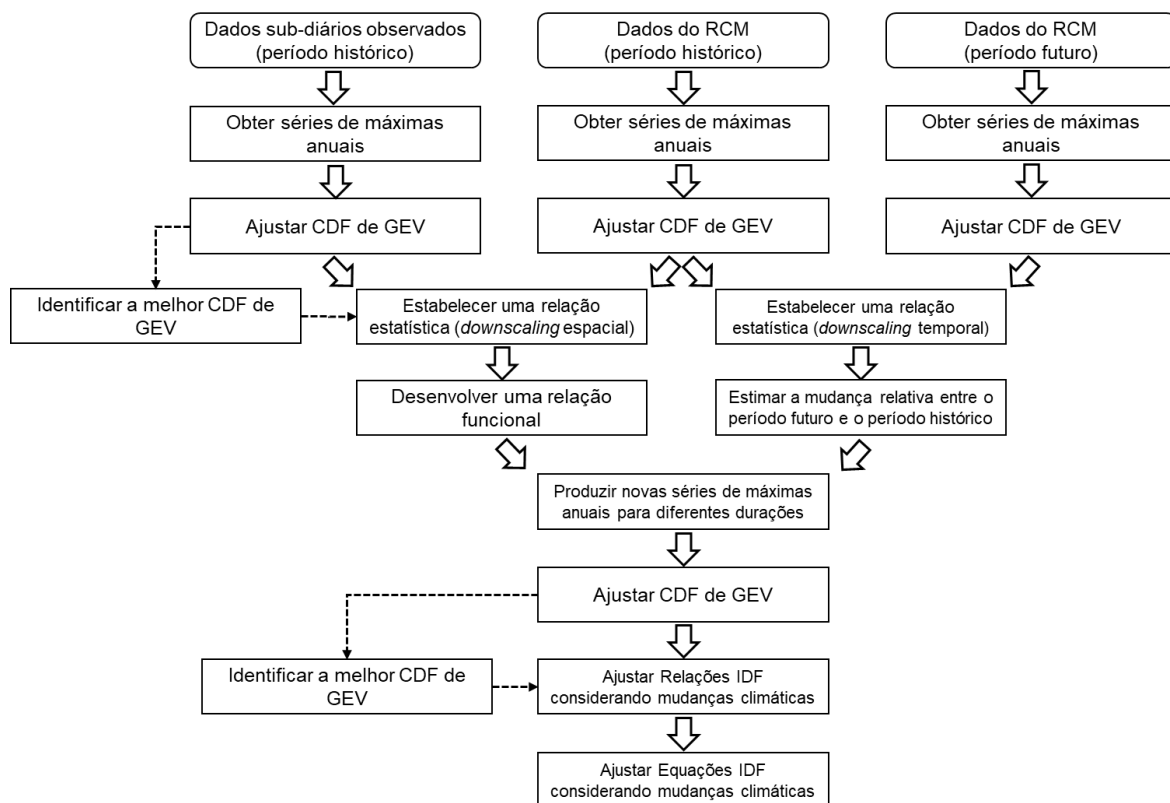


Figura 5-5. Fluxograma da metodologia de adaptação de curvas IDF sob o efeito de mudanças climáticas, considerando não-estacionariedade. Fonte: SILVA *et al.* (2021b).

5.6 Avaliação de modelos climáticos

5.6.1 Análise da sensibilidade das precipitações intensas no futuro à escolha de diferentes modelos climáticos

O uso dos resultados de um único modelo climático na análise dos efeitos de mudanças climáticas limita-os às condições de simulação e o seu equacionamento. Logo, faz-se importante observar o comportamento dos diferentes modelos climáticos, principalmente para a análise de incertezas e comparação de determinado modelo em relação a todo o conjunto de modelos.

De modo a analisar a sensibilidade das precipitações intensas futuras à escolha de determinado modelo climático, e ainda, à abordagem metodológica (estacionária e não-estacionária); foram estimadas precipitações intensas na forma de intensidade máxima de precipitação associada a diferentes tempos de retorno. A partir dos diferentes resultados por modelo, gráficos do tipo *boxplot* foram construídos, a exemplo do apresentado na Figura 5-6, pois permitem entender a variabilidade e incerteza inerentes às decisões de modelo (SILVA *et al.*, 2021c), que neste trabalho remete ao modelo GCM de contorno ao Eta, e abordagem.

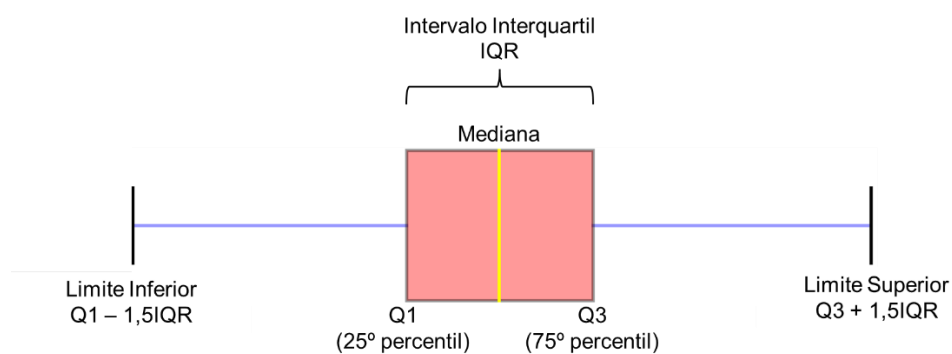


Figura 5-6. Representação do gráfico do tipo *boxplot*.

5.6.2 Avaliação dos modelos climáticos na representatividade de eventos extremos

Na seção 5.5 foram apresentadas as metodologias utilizadas na geração de curvas IDF adaptadas às mudanças climáticas. Entretanto, a aplicação de um único modelo climático limita os resultados produzidos e, deste modo, faz-se necessária a avaliação de diferentes modelos climáticos para o uso em geração de IDFs futuras. Neste trabalho, os diferentes modelos climáticos apresentados na Tabela 5-1 foram avaliados utilizando o método de Taylor (TAYLOR, 2001). Essa análise permite quantificar o desempenho do modelo em relação aos dados observados, para que

haja certa confiabilidade do mesmo em representar as precipitações intensas no período futuro. A utilização do método de Taylor envolve duas etapas: (i) a correção de viés; e (ii) a estimativa da pontuação de Taylor, conhecida como *Taylor's score*.

Inicialmente, as séries de precipitações máximas anuais observadas e simuladas, ambas no período histórico, foram pareadas, para cada estação e modelo climático. Por exemplo, dados observados para Porto Alegre compreendem o período de 1975 a 2014; enquanto dados simulados para a mesma estação compreendem o período de 1961 a 2005. Neste caso, e considerando apenas a avaliação dos modelos climáticos, considerou-se dados do período de 1975 a 2005 para Porto Alegre. Além de um total de modelos climáticos, incluiu-se na avaliação as séries de máximas, mínimas e mediana dos modelos climáticos. Essa avaliação foi realizada para as séries de precipitação simuladas de resolução diária e de 3-h.

Em se tratando de séries de precipitação máximas anuais, a correção de viés foi realizada a partir do mapeamento de quantis entre as séries de precipitação máximas simuladas e observadas, no período histórico, calculado segundo apresenta a Equação (5-11). Os quantis corrigidos de resolução diária foram pareados aos quantis observados de diferentes durações. Já para as séries simuladas de resolução 3-h, utilizou-se da soma móvel para a construção de diferentes séries simuladas. Por exemplo, quantis observados de duração 30 min foram pareados aos quantis corrigidos de resolução 3-h e diárias; enquanto quantis observadas de duração 14-h foram pareados aos quantis corrigidos de duração 24-h (obtidas a partir da soma móvel da série simulada de 3-h) e diárias.

Para avaliar o desempenho dos modelos climáticos, a pontuação de Taylor foi adotada, conforme Equação (5-18). Baseada no diagrama de Taylor (TAYLOR, 2001), a pontuação apresenta um resumo estatístico de do potencial de determinado modelo climático em reproduzir as características dos eventos intensos observados, em termos de correlação e a taxa de variação entre as séries. A pontuação de Taylor é então estimada com base nos dados observados e os dados dos modelos corrigidos (isto é, após correção de viés), para cada estação. Quanto maior a pontuação, mais representativo é o modelo analisado.

$$P = \frac{4(1 + R)}{\left(\hat{\sigma}_s + \frac{1}{\hat{\sigma}_s}\right)^2 (1 + R_0)} \quad (5-18)$$

em que: P é a pontuação de Taylor, variando entre 0 (menor pontuação) e 1 (maior pontuação); R é o coeficiente de correlação entre a série de dados simulados pelo modelo climático e a série de dados observados; R_0 é o máximo coeficiente de correlação possível (utilizou-se R_0 igual a 1, que é o máximo possivelmente obtido); e $\hat{\sigma}_s$ é a relação entre o desvio padrão dos dados simulados e o desvio padrão dos dados observados.

5.6.3 Expectativas de Mudança do Clima

As curvas IDF produzidas a partir das metodologias mencionadas no item 5.5 são produzidas após tratamento dos dados brutos. Nesta seção, foram analisados os dados brutos obtidos pelos modelos climáticos, de modo a entender as expectativas de mudanças do clima produzidas pelo mesmo, para ambas as resoluções temporais disponíveis (3-horas e Diária).

A partir dos dados brutos obtidos a partir da plataforma PROJETA, para os períodos histórico (cenário de base) ou e futuro (cenários RCP 4.5 e RCP 8.5), relações IDF foram estimadas para os cenários mencionados. Os resultados produzidos permitiram entender as expectativas de mudanças do clima, mais especificamente dos eventos intensos, provenientes das simulações dos modelos climáticos.

5.7 Avaliação dos impactos das mudanças climáticas nas curvas IDF

Nesta seção, serão apresentadas as métricas utilizadas na avaliação dos impactos das mudanças climáticas sob as curvas IDF, comparando-se os períodos histórico e futuro. Para o período futuro, foram ainda avaliadas as curvas IDF produzidas utilizando o método EQM, estacionário, e EQM_{NS}, não-estacionário. Tais análises foram conduzidas aos diferentes produtos climáticos (discretização temporal e cenários de projeção).

5.7.1 Análise de Tendência

A análise de tendência foi realizada aos moldes da metodologia apresentada na Seção 5.4.2. As séries de precipitação máximas anuais, ajustes de modelo de distribuição de probabilidade foram conduzidos para ambos os períodos, histórico e futuro. A análise de eventos intensos no período histórico é um passo importante ao

desenvolvimento de IDFs no futuro, pois permite o entendimento das IDFs em termos de sua probabilidade de excedência, seja estacionário ou não-estacionário. Aqui, seis modelos GEV (um estacionário e cinco não-estacionários) foram utilizados para identificar e analisar tendências associadas às precipitações máximas anuais históricas, para cada estação avaliada. O método da máxima verossimilhança foi adotado para ajustar os dados à distribuição teórica de probabilidade.

Inicialmente, o método CIA foi aplicado para comparar os diferentes modelos de GEV. Em adição, um teste de significância baseado na razão de verossimilhança foi aplicado em vias de comparar se o modelo não-estacionário melhora significativamente o ajuste à distribuição estatística quando comparado ao ajuste do modelo estacionário. Utilizou-se o p-valor de 0,05 como nível de significância. Por fim, utilizou-se o gráfico Quantil-Quantil para avaliação da aderência do melhor modelo GEV, a partir do coeficiente de determinação do ajuste dos dados ao modelo. Etapa permitiu identificar: (i) se há tendência associada às séries de precipitações máximas anuais; e (ii) quando houver tendência associada, sinaliza qual das configurações utilizadas melhor se ajusta aos dados.

5.7.2 Mudança Relativa

Dados os efeitos das mudanças climáticas, espera-se que, para dada duração de precipitação e probabilidade de ocorrência, a intensidade e magnitude da precipitação variem no decorrer dos anos. A mudança relativa permite quantificar a magnitude dos efeitos das mudanças climáticas sob as curvas IDF, em intensidade máxima. Também conhecida como “fator de mudança”, a mudança relativa representa, em porcentagem, os efeitos das mudanças climáticas no período futuro em relação ao período histórico, conforme Equação (5-19):

$$MR = \frac{I_f - I_h}{I_h} \cdot 100\% \quad (5-19)$$

em que: MR é a mudança relativa, em %; I_f é a intensidade máxima de precipitação no período futuro, em mm/h; e I_h é a intensidade máxima de precipitação no período histórico, em mm/h. Ressalta-se que, como IDFs no período histórico são produzidas via modelagem estacionária, essas equações IDFs foram assim estimadas. Quanto as IDFs no período futuro, foram estimadas adotando-se o método EQM (estacionário) e EQM_{NS} (não-estacionário).

As estimativas de IDF futuras serão conduzidas para o ano-horizonte de 2099.

5.7.3 Intensidade da Precipitação

Utilizando-se os métodos EQM (estacionário) e EQM_{NS} (não-estacionário), curvas de intensidade de precipitação foram estimadas ao período futuro, ao passo que essa análise permitiu quantificar o efeito da não-estacionariedade sob as curvas IDF no período futuro. As análises foram conduzidas para uma mesma probabilidade de ocorrência.

Para fins deste trabalho, foram considerados dois eventos de precipitação comumente utilizados em projetos de micro e macrodrenagem, em conformidade aos Planos Diretores de São Paulo e Porto Alegre (SÃO PAULO, 2012; IPH, 2005). São eles: (i) eventos de 1 h de duração e tempo de retorno de 10 anos, utilizado na estimativa de vazão de restrição; e (ii) eventos de 24 h de duração e tempo de retorno de 100 anos, usuais para mapeamento de zonas inundáveis. Foram estimadas as precipitações intensas associadas a esses eventos no período histórico e, com o uso das equações IDF futuras, novos tempos de retorno foram calculados para esses eventos em específico.

Dado que as equações IDF não-estacionárias estimadas neste trabalho variam no decorrer do tempo, as equações IDF não-estacionárias conduzidas nesta seção foram estimadas para o ano-horizonte de 2099.

5.7.4 Probabilidade de Ocorrência

Além da intensidade da precipitação, outra visão dos impactos das mudanças climáticas pode discorrer sob a probabilidade de ocorrência de eventos extremos. Nesse sentido, analisou-se a frequência associada aos eventos extremos no período futuro, em termos de período de retorno ou tempo de retorno ou período de recorrência.

Para esta análise, adotou-se a seguinte abordagem, por exemplo: dada uma intensidade de precipitação de duração 1 h e tempo de retorno de 10 anos, no período histórico, identificou-se o tempo de retorno associado a mesma intensidade de precipitação de 1 h, no período futuro. Esta abordagem permite identificar o quão frequente (ou quão raro) um evento extremo pode vir a se tornar no futuro. Adotou-se o ano-horizonte de 2099.

5.7.5 Análise de incertezas

As estimativas de precipitações intensas no futuro são valores considerados esperados, dadas as condições a eles aplicadas. Contudo, incertezas são inerentes a este tipo de estimativa, seja por parte dos métodos de análise de frequência ou modelos climáticos utilizados para esta finalidade. Uma vez que os modelos climáticos utilizados na geração de relações IDF adaptadas foram similares, a principal diferença entre os resultados remete à análise de frequência utilizada, estacionária ou não-estacionária.

Dado que a estimativa de precipitações intensas geralmente corresponde a eventos acima do domínio, incertezas neste tipo de quantificação são comuns. No tocante à modelagem não-estacionária, nota-se maior complexidade, pois um maior número de parâmetros é adicionado (OBEYESEKERA; SALAS, 2014). Neste sentido, dadas as incertezas inerentes à estimativa de precipitações intensas para o futuro, àquelas associadas à análise de frequência e distribuição de probabilidade adotada foram analisadas. Aqui, as incertezas foram analisadas com base nos intervalos de confiança calculados pelo método paramétrico *bootstrap* (EFRON; TIBSHIRANI, 1993) em ambiente *RStudio* através do pacote *extRemes* (versão 2.1-1) (GILLELAND, 2021). Os intervalos de confiança foram estimados para um nível de confiança de 95%.

6 RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os resultados provenientes desta Tese de Doutorado.

A metodologia proposta foi aplicada para séries de precipitações máximas anuais em dois locais, baseando-se nas estações de monitoramento pluviográfico de São Paulo e Porto Alegre. A princípio, são apresentadas análises de tendência em precipitações intensas associadas ao período histórico de dados, utilizando-se de análises estatísticas, conforme apresentado no item 6.1. Ainda, são apresentados os efeitos das tendências identificadas (modelagem não-estacionária) nas estimativas de precipitações intensas do período histórico, em comparação ao uso de modelagem estacionária.

Uma vez que este trabalho se baseia no uso de produtos de simulação climática (provenientes do modelo Eta), utilizou-se da análise do desempenho dos modelos na seção 6.2: (i) utilizando a Pontuação de Taylor (TAYLOR, 2001) na verificação dos modelos quanto à representação das precipitações intensas observadas; e (ii) produzindo IDFs futuras para os diferentes modelos climáticos e métodos de estimativa, de modo a analisar a faixadas incertezas associadas; e (iii) avaliando as expectativas de mudança do clima por parte dos produtos climáticos.

No item 6.3, e com base nos resultados provenientes do item 6.2, são avaliados os impactos das mudanças climáticas nas curvas IDF. Para tal, foram utilizadas projeções climáticas para o período de 2020 a 2099 e cenários de emissão de gases de efeito estufa RCP 4.5 e RCP 8.5. Além das comparações das estimativas de curvas IDF entre os períodos histórico e futuro, analisou-se as expectativas das precipitações intensas utilizando-se de análise de frequência estacionária e não-estacionária. Os impactos das mudanças climáticas nas curvas IDF foram quantificados em termos de: (i) observação das curvas IDF adaptadas; (ii) no formato de mudança relativa, ou seja, comparação entre os períodos histórico e futuro; (iii) probabilidade de ocorrência, de modo a verificar a frequência associada aos eventos intensos no período futuro. Por fim, dadas as incertezas associadas às estimativas de precipitações intensas decorrentes da análise de frequência adotada, foram estimados os limites de confiança para essas estimativas.

6.1 Análise aos dados históricos

A análise aos dados históricos foi realizada de modo a investigar possíveis tendências associadas, com base em análise de frequência não-estacionária, e seus impactos às curvas IDF no período presente.

6.1.1 Análise de tendência associada às precipitações intensas

6.1.1.1 Estação 8^o DISME – Porto Alegre

Seis modelos de GEV foram avaliados na análise e identificação de tendências, conforme configurações dos parâmetros da distribuição (ver Tabela 5-2). A Tabela 6-1 apresenta os valores de Δ_i , provenientes do método CIA, para a estação de Porto Alegre. Segundo os resultados, observa-se que os valores ranqueados conduzem ao modelo estacionário (GEV-I), exceto para a duração de 14 h, em que GEV-II se apresenta como modelo de melhor desempenho, embora GEV-I também apresente um bom desempenho, dado que $\Delta_i < 2$. Ao aplicar o teste de significância, esses resultados são reforçados pelos resultados do teste de significância, apresentados na Tabela 6-2, em que, quando comparados ao modelo estacionário, nenhum dos modelos não-estacionários se mostrou superior.

Os resultados aqui reportados indicam que, com base na série histórica utilizada, nenhum modelo não-estacionário promove melhor ajuste que o modelo estacionário para Porto Alegre, sugerindo que não há tendência associada às precipitações intensas. A Tabela 6-3 apresenta o R^2 dos gráficos Quantil-Quantil para as diferentes durações de precipitação, indicando bom ajuste do modelo aos dados. Resultados suplementares podem ser verificados no Apêndice I-A e Apêndice I-B. Os parâmetros de ajuste de GEV-I utilizados podem ser verificados no Apêndice I-C.

Tabela 6-1. Valores de Δ_i , para séries históricas da estação Porto Alegre.

Duração	Δ_i					
	I	II	III	IV	V	VI
5 min	0,00	2,44	4,58	4,53	2,23	2,21
10 min	0,00	2,45	4,07	4,03	1,67	1,64
15 min	0,00	2,47	4,63	4,61	2,04	2,03
30 min	0,00	2,15	3,24	3,37	0,65	0,79
45 min	0,00	2,48	4,88	4,90	2,29	2,31
1 h	0,00	2,44	4,32	4,41	1,73	1,80
2 h	0,00	2,42	3,80	3,87	1,21	1,28
3 h	0,00	2,12	3,40	3,52	0,99	1,11
4 h	0,00	2,33	4,52	4,54	2,00	2,01
8 h	0,00	1,12	3,41	3,38	2,04	1,98
14 h	0,38	0,00	2,17	2,14	2,24	2,16
24 h	0,00	0,20	1,82	1,75	2,03	1,96

Tabela 6-2. Significância estatística (p-valor) comparando os diferentes modelos de GEV, para dados históricos da estação Porto Alegre.

Duração	p-valor				
	I x II	I x III	I x IV	I x V	I x VI
5 min	0,86	0,77	0,75	0,62	0,61
10 min	0,87	0,60	0,59	0,37	0,36
15 min	0,96	0,79	0,79	0,51	0,50
30 min	0,57	0,39	0,42	0,18	0,19
45 min	0,98	0,90	0,90	0,67	0,68
1 h	0,84	0,68	0,71	0,39	0,41
2 h	0,81	0,52	0,54	0,26	0,27
3 h	0,55	0,43	0,46	0,22	0,24
4 h	0,70	0,75	0,75	0,49	0,49
8 h	0,24	0,43	0,42	0,51	0,48
14 h	0,09	0,19	0,19	0,43	0,40
24 h	0,13	0,19	0,19	0,50	0,47

Tabela 6-3. Coeficiente de determinação do melhor modelo de GEV (modelo estacionário – GEV-I) para séries históricas da estação Porto Alegre.

Duração	R_{QQ}^2
5 min	0,986
10 min	0,987
15 min	0,982
30 min	0,982
45 min	0,981
1h	0,973
2h	0,947
3 h	0,937
4 h	0,941
8 h	0,974
14 h	0,977
24 h	0,977

6.1.1.2 Estação IAG-USP – São Paulo

Para a estação de São Paulo, a Tabela 6-4 apresenta os valores de Δ_I , provenientes do método CIA. Segundo os resultados, observa-se que os valores ranqueados conduzem aos modelos não-estacionário GEV-III e GEV-IV. O modelo GEV-IV é caracterizado pela tendência exponencial apenas no parâmetro de escala, sendo ranqueado como melhor para as durações 1 h, 2 h e 3 h; enquanto o modelo GEV-III, que é caracterizado pela tendência linear nos parâmetros de localização e escala, é ranqueado como melhor para as demais durações.

O teste da razão da verossimilhança foi então aplicado para avaliar o desempenho dos modelos não-estacionários em relação ao modelo estacionário, e os resultados são apresentados na Tabela 6-5. Desta tabela, observa-se que a tendência avaliada anteriormente é validada para um alto nível de significância. De fato, os modelos GEV-II, GEV-III e GEV-IV se apresentam superiores ao GEV-I (com p-valor muito inferior a 0,05), contudo, de maneira geral, o GEV-III se apresenta como superior ao estacionário para a maioria das durações, sendo esse o modelo adotado. A condição de predominância da não-estacionariedade para as chuvas intensas de diferentes durações em São Paulo aqui apresentada é similar às condições apresentadas por estudos como o de Sugahara *et al.* (2009), Marengo *et al.* (2013), Silva Dias *et al.* (2013), que desde antes já alertavam para significantes mudanças associadas as chuvas intensas diárias em São Paulo. Segundo os autores, efeitos climáticos de larga escala, como os índices climáticos, e efeitos urbanos regionais ou locais, como ilhas de calor, são fenômenos que estão relacionados às mudanças no sistema climático urbano e, conseqüentemente, nas precipitações intensas (MARENGO *et al.*, 2020)

A partir do melhor modelo, a aderência dos dados ao modelo foi avaliada pelo gráfico Quantil-Quantil, cujo coeficiente de determinação é apresentado na Tabela 6-6. Os resultados obtidos indicam boa aderência do ajuste do modelo aos dados. Resultados suplementares podem ser verificados no Apêndice I-A e Apêndice I-B. Os parâmetros de ajuste de GEV-I utilizados podem ser verificados no Apêndice I-C.

Tabela 6-4. Valores de Δ_i , para séries históricas da estação São Paulo.

Duração	Δ_i					
	I	II	III	IV	V	VI
1 h	14,21	1,09	0,02	0,00	16,38	16,38
2 h	17,24	2,86	0,28	0,00	19,28	19,22
3 h	20,07	5,45	0,08	0,00	22,25	22,24
4 h	21,55	10,03	0,00	0,56	23,23	22,94
8 h	17,65	10,89	0,00	3,09	16,74	16,65
14 h	13,90	7,76	0,00	1,34	14,41	14,27
24 h	13,58	6,50	0,00	1,56	14,69	14,68

Tabela 6-5. Significância estatística (p-valor) comparando os diferentes modelos de GEV, para dados históricos da estação São Paulo.

Duração	p-valor				
	I x II	I x III	I x IV	I x V	I x VI
1 h	9e-5	9e-5	9e-5	0,85	0,84
2 h	5e-5	2e-5	2e-5	0,07	0,64
3 h	4e-5	5e-6	5e-6	0,88	0,86
4 h	2e-4	2e-6	3e-6	0,47	0,37
8 h	3e-3	2e-5	7e-5	0,78	0,74
14 h	4e-3	1e-4	2e-4	0,19	0,18
24 h	2e-3	1e-4	3e-4	0,30	0,29

Tabela 6-6. Coeficiente de determinação do melhor modelo de GEV para séries históricas da estação São Paulo.

Duração	R_{QQ}^2
1 h	0,991
2 h	0,991
3 h	0,988
4 h	0,982
8 h	0,986
14 h	0,986
24 h	0,985

6.1.2 Intensidade máxima de precipitação (Curvas IDF)

Na sequência aos resultados obtidos do item 6.1.1 foram extraídos os parâmetros da distribuição de GEV correspondentes ao modelo que melhor se ajustou aos dados, para as diferentes durações de precipitação. Quantis foram, então, estimados para diferentes tempos de retorno e curvas IDF foram ajustadas de acordo com a formulação da Equação (3-3).

6.1.2.1 Estação 8º DISME – Porto Alegre

A Figura 6-1 apresenta a curva IDF obtida para a estação de Porto Alegre. Para essa estação, somente curvas IDF estacionárias foram estimadas, uma vez que nenhuma tendência associada foi identificada.

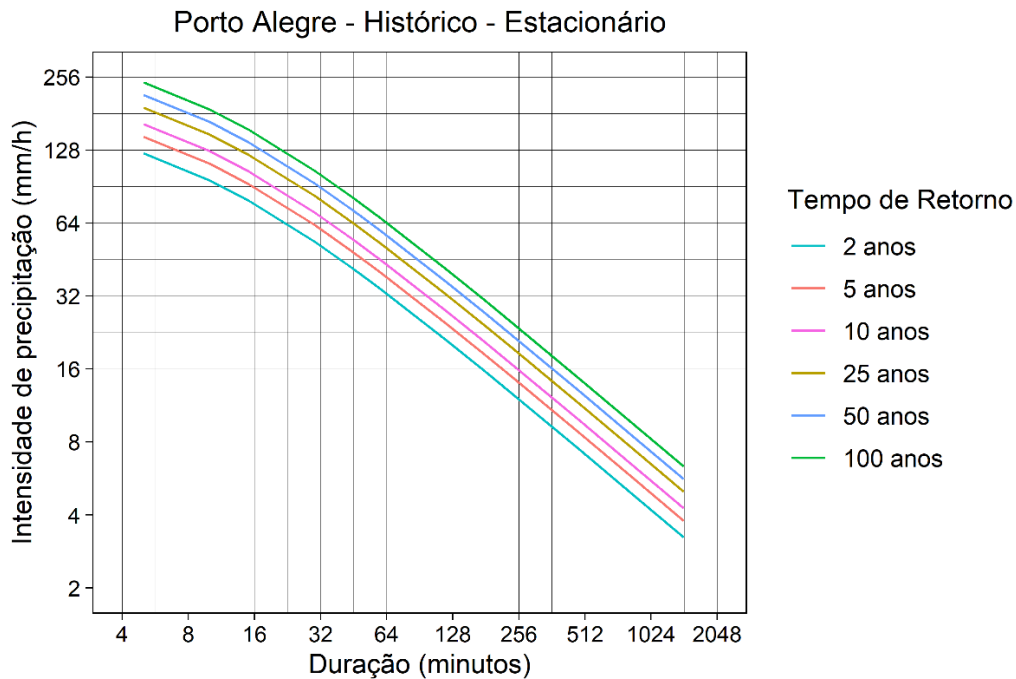


Figura 6-1. Curvas IDF (estacionária) para a estação 8º DISME – Porto Alegre, no período histórico, para diferentes tempos de retorno.

Para a estação em análise, diversas equações IDF estão disponíveis, construídas para outros períodos e utilizando outras distribuições estatísticas. Como exemplo, destacam-se as equações de Bemfica *et al.* (2000), produzida com dados de 1974 a 1998 e distribuição de Gumbel, e a de Helfer, Dornelles e Goldenfum (2017), produzidas com dados entre 1974 e 2014 e utilizando-se distribuição Exponencial. A Tabela 6-7 apresenta os parâmetros da equação obtidos para este trabalho e advindos das outras equações. As intensidades de precipitação obtidas pelas diferentes curvas IDF são apresentadas no Apêndice I-D. Ao compararmos as intensidades de precipitação obtidas pelas diferentes equações à produzida neste trabalho, observa-se diferença máxima -13% para chuvas de duração 60 min (TR 10 anos) em comparação à produzida por Bemfica *et al.* (2000) e de -10% para tempo de retorno de 100 anos (duração 24 h) em comparação à produzida por Helfer, Dornelles e Goldenfum (2017) (Tabela 6-8). As diferenças obtidas não necessariamente são justificadas pelo comportamento da precipitação, podendo, provavelmente, ser referentes às distintas distribuições de probabilidade utilizadas e métodos de ajuste de curvas para a mesma finalidade.

Tabela 6-7. Parâmetros da equação IDF para Porto Alegre, período histórico.

Porto Alegre	Coeficientes*				Estatísticas**	
	a	b	c	d	RQME (mm/h)	DMPA (%)
IDF Estacionária	778,993	0,172	7,697	0,770	4,94	5,59
IDF (HELPER; DORNELLES; GOLDENFUM, 2017)	787,388	0,204	8,461	0,778	4,55	5,65
IDF (BEMFICA <i>et al.</i> , 2000)	1297,60	0,171	11,62	0,850	-	-

*a,b,c,d são os coeficientes da IDF, conforme formulação da Equação (3-3).

**RQME é a raiz do quadrado médio do erro, e DPMA é o desvio percentual médio absoluto.

Tabela 6-8. Intensidade de precipitação, em mm/h, para as diferentes curvas IDF disponíveis em Porto Alegre, no período histórico.

Porto Alegre	Intensidade de precipitação (mm/h)	
	1 h e TR 10 anos	24 h e TR 100 anos
IDF Estacionária	45,08	6,37
IDF (HELPER; DORNELLES; GOLDENFUM, 2017)	47,01	7,00
IDF (BEMFICA <i>et al.</i> , 2000)	50,98	5,85

*a,b,c,d são os coeficientes da IDF, conforme formulação da Equação (3-3).

**RQME é a raiz do quadrado médio do erro, e DPMA é o desvio percentual médio absoluto.

6.1.2.2 Estação IAG-USP – São Paulo

Para a estação de São Paulo, os quantis para os diferentes tempos de retorno foram estimados com base no melhor modelo de GEV avaliado, o GEV-III. Para este cálculo, adotou-se uma abordagem conservadora, baseando-se no 95º percentil dos parâmetros variáveis para estimativa dos quantis de precipitação. As curvas IDF não-estacionárias foram ajustadas. Ainda, e para fins de comparação, foram estimados os quantis e curvas IDF correspondentes ao modelo estacionário. A Figura 6-2 apresenta as curvas IDF adotadas ao modelo estacionário e não-estacionário, respectivamente. Os coeficientes ajustados para ambas as abordagens são apresentados na Tabela 6-9.

A diferença média entre as curvas IDF estacionárias e não-estacionárias, para o mesmo tempo de retorno, foi de aproximadamente 23%, com maiores diferenças para eventos de longa duração e alta frequência. Ainda, observa-se que, para a mesma intensidade de precipitação, a abordagem não-estacionária reduz

consideravelmente o tempo de retorno associado. Por exemplo, os valores referentes à curva IDF estacionária de tempo de retorno de 5 anos muito se aproxima aqueles da curva IDF não-estacionária de tempo de retorno de 2 anos (eventos de duração igual a 1 hora); e os valores referentes à curva IDF estacionária de tempo de retorno de 100 anos se aproxima aos da curva IDF não-estacionária de tempo de retorno de 25 anos. Estes resultados indicam uma redução do tempo de retorno associados, que em outras palavras indica um aumento na frequência dos eventos intensos.

Os resultados obtidos para a estação de São Paulo são críticos, pois, mesmo no período histórico, observa-se que as estatísticas aqui analisadas indicam estimativas de precipitação muito inferiores quando do uso de modelagem estacionária em comparação a modelagem não-estacionária. Quando aplicadas a projetos de drenagem urbana e manejo de águas pluviais, por exemplo, esses valores subdimensionam as redes e reduzem o risco de projeto tolerável ao qual as redes foram projetadas. Na verdade, a ocorrência de alagamentos e inundações no município de São Paulo é um problema recorrente (LIMA; RUEDA, 2018), dado que a capacidade das estruturas é superada; e além dos problemas usuais que são relacionados ao planejamento urbano (intensa impermeabilização), manutenção do sistema de drenagem, entende-se que pode ter relação com o subdimensionamento das estruturas.

Para fins de comparação, foram adotadas algumas intensidades máximas de precipitação produzidas pela equação IDF de São Paulo encontradas na literatura, conforme descrito no item 5.2.2. As IDFs mencionadas foram construídas para outros períodos, uma com dados até 1997 (SÃO PAULO, 2012) e outra com dados até 2011 (DAEE, 2018), utilizando-se distribuição de Gumbel. As intensidades de precipitação obtidas pelas diferentes curvas IDF são apresentadas no Apêndice I-D. Ao compararmos as intensidades de precipitação obtidas pelas diferentes equações à produzida neste trabalho, observa-se diferença máxima -2% para chuvas de duração 60 min (TR 10 anos) em comparação à apresentada em São Paulo (2012) e de +11% para tempo de retorno de 100 anos (duração 24 h) em comparação à apresentada em DAEE (2018). As diferenças obtidas não necessariamente são justificadas pelo comportamento da precipitação, podendo, provavelmente, ser referentes às distintas distribuições de probabilidade utilizadas e métodos de ajuste de curvas para a mesma finalidade. De maneira geral, observa-se um aumento mais acentuado das novas intensidades (produzidas neste trabalho) comparadas às de 1997 que as de 2011,

aumento este mais expressivo para os eventos de maior duração e menor frequência. Por exemplo, os resultados indicam um aumento de até 45% da nova IDF em relação a de 1997 e um aumento de 25% da nova IDF em relação a de 2011 (TR 2 anos e duração 24-h)

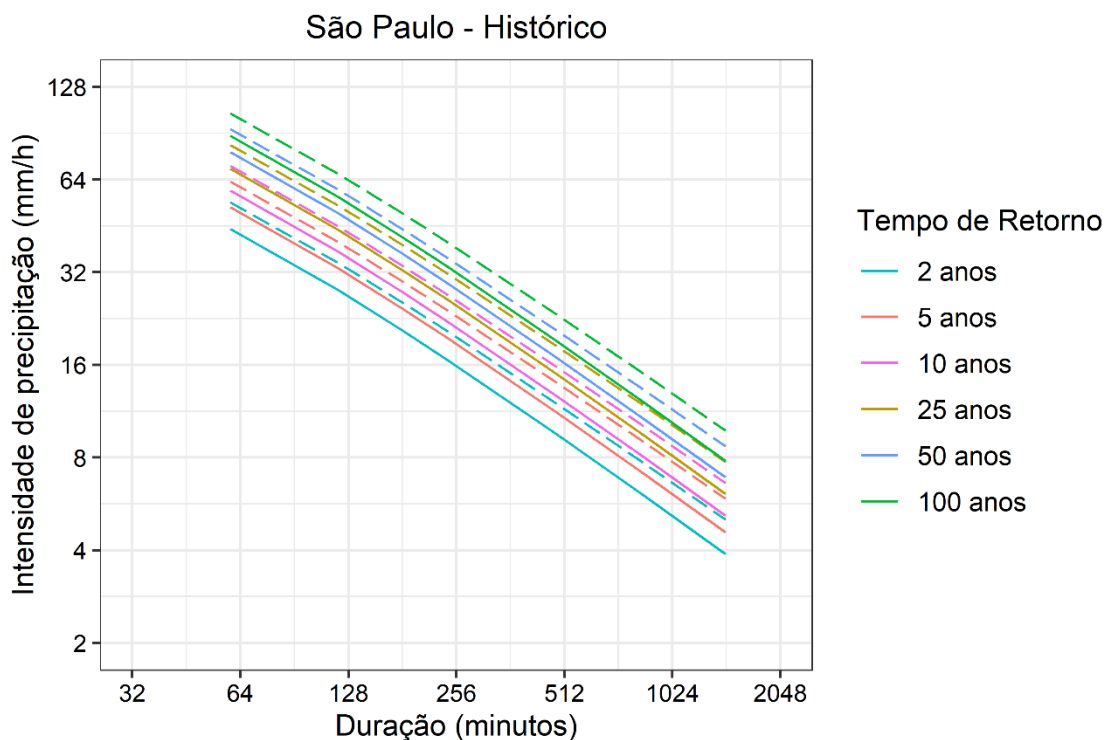


Figura 6-2. Curvas IDF para a estação IAG/USP– São Paulo no período histórico. Curvas contínuas são curvas estacionárias, e curvas tracejadas são não-estacionárias, para diferentes tempos de retorno.

Tabela 6-9. Parâmetros das equações IDF para São Paulo, período histórico.

São Paulo	Coeficientes*				Estatísticas*	
	a	b	c	d	RQME (mm/h)	DPMA (%)
IDF Estacionária	1.717,34	0,178	24,364	0,853	1,34	5,51
IDF Não-estacionária	1.801,42	0,170	21,843	0,823	1,44	5,40

*a,b,c,d são os coeficientes da IDF, conforme formulação da Equação (3-3).

**RQME é a raiz do quadrado médio do erro, e DPMA é o desvio percentual médio absoluto.

6.2 Avaliação dos Modelos Climáticos

6.2.1 Incertezas associadas à adoção de modelos climáticos

Estimativas de intensidade de precipitação no período futuro utilizando os modelos climáticos disponíveis pelo modelo Eta são apresentados no Apêndice II. Os

gráficos *boxplot* apresentam as incertezas em estimar intensidades de precipitação no período futuro inerentes à escolha de um único modelo climático.

Para a estação Porto Alegre, RCP 4.5, observa-se que as diferenças obtidas entre as abordagens estacionária e não-estacionárias são mínimas, e isso ocorre porque, para este cenário de emissão, a maioria dos modelos produziu séries de precipitações máximas futuras com comportamento estacionário. Para o cenário RCP 8.5, em que as precipitações máximas futuras obtidas pelos diversos modelos apresenta comportamento não-estacionário, as intensidades máximas obtidas para abordagem não-estacionária apresentam maior variabilidade e medianas posicionadas superiormente àquelas obtidas pela abordagem estacionária. Uma vez que, para esta estação, foi definido um comportamento estacionário no período histórico, a variabilidade das estimativas de intensidade de precipitação se apresenta exclusivamente intrínseca aos produtos climáticos para o período futuro e abordagens adotadas.

Para a estação São Paulo, observa-se que as intensidades de precipitação obtidas via abordagem não-estacionária são mais acentuadas que aquelas obtidas via abordagem estacionária. Isso ocorre porque, no período histórico, as séries de precipitações máximas desta estação apresentam comportamento não-estacionário (GEV-III, item 6.1.1), potencializando os resultados no futuro.

De maneira geral, observa-se maior variabilidade para eventos de menor duração (inferior a 1-h para estação Porto Alegre e inferior a 8-h para estação São Paulo) e menor frequência (eventos mais raros), independente da resolução temporal e cenário de emissão de gases. Ainda, os valores estimados sob condições estacionárias subestimam aqueles sob condições não-estacionárias. Em relação à magnitude da variabilidade, estas também se mostram superiores sob condições não-estacionárias, dada a particularidade de cada modelo climático e complexidade de estimar intensidades sob condições não-estacionárias, conforme descrito em Ouarda, Charron e St-Hillaire (2020).

6.2.2 Pontuação de Taylor

A avaliação de impactos de mudanças climáticas requer o uso de modelos climáticos que simulem o comportamento do clima em um determinado período no futuro. Entretanto, nem sempre os modelos climáticos conseguem representar com

exatidão o comportamento dos elementos do clima, em especial aos eventos intensos, que são particularmente complexos. Neste sentido, faz-se necessária a avaliação do desempenho dos modelos.

Nessa seção, são apresentados os resultados de desempenho dos diferentes GCMs utilizados como contorno ao Eta, bem como o conjunto dos modelos em termos de sua mínima, mediana e máxima. Ainda, apresenta a pontuação para os produtos dos modelos climáticos em 02 resoluções temporais: 3-horas e Diária. Os resultados foram construídos com base na comparação das séries de precipitações máximas anuais observadas com as séries de precipitações máximas anuais simuladas pelos modelos, utilizando a pontuação de Taylor.

A Figura 6-3 apresenta o mapa de calor que representa a pontuação de Taylor para diferentes durações de precipitação corrigida para a estação de Porto Alegre e a Figura 6-4 para a estação de São Paulo.

De acordo com os resultados, o modelo Eta-BESM apresentou uma boa pontuação na maioria dos casos, com exceção ao de resolução 3-horas na estação de Porto Alegre, em que as simulações Eta-CANESM2 e Eta-MIROC5 apresentaram melhor desempenho em relação aos dados observados. A variabilidade da pontuação de Taylor manteve-se entre 0,3 e 0,7, valores comuns às análises desta natureza (GANGULI; COULIBALY, 2019; SILVA *et al.*, 2021c) e de outros índices de precipitação (ZHU *et al.*, 2020). Entre os modelos climáticos, o Eta-HADGEM2-ES e Eta-MIROC5 foram os modelos que apresentaram pior desempenho nas estações de Porto Alegre e de São Paulo, respectivamente.

Os resultados não indicaram diferença na pontuação entre as resoluções temporais, de modo que mesmo o uso da resolução 3-horas não apresentou desempenho superior em relação à resolução Diária. Quanto à resolução espacial de 5km e 20 km, disponível para a região de São Paulo, não se observou desempenho superior do uso de dados do modelo Eta-HADGEM-ES (5km).

Quanto aos conjuntos dos modelos, o mínimo e máximo dos modelos não apresentou desempenho superior à mediana. A mediana apresentou comportamento semelhante para todos os casos e estações avaliadas. A mediana dos modelos apresentou pontuação variando entre 0,44 e 0,55 para São Paulo, e entre 0,46 e 0,57 para Porto Alegre. Essa pontuação é considerada moderada.

Apesar do desempenho relativamente superior do modelo Eta-BESM em relação à mediana dos modelos, o uso da mediana é encorajado por considerar diferentes aspectos de simulação do clima (MIN *et al.*, 2014; RAJCZAK; SCHAR, 2017). A adoção da mediana dos modelos para geração das futuras IDF e avaliação dos impactos é razoável, pois permite a consideração das particularidades de todos os modelos climáticos, reduzindo as incertezas associadas ao uso de um único modelo climático (GANGULI; COULIBALY, 2019; SCHARDONG; SIMONOVIC, 2019; COOK; MCGINNIS; SAMARAS, 2020).

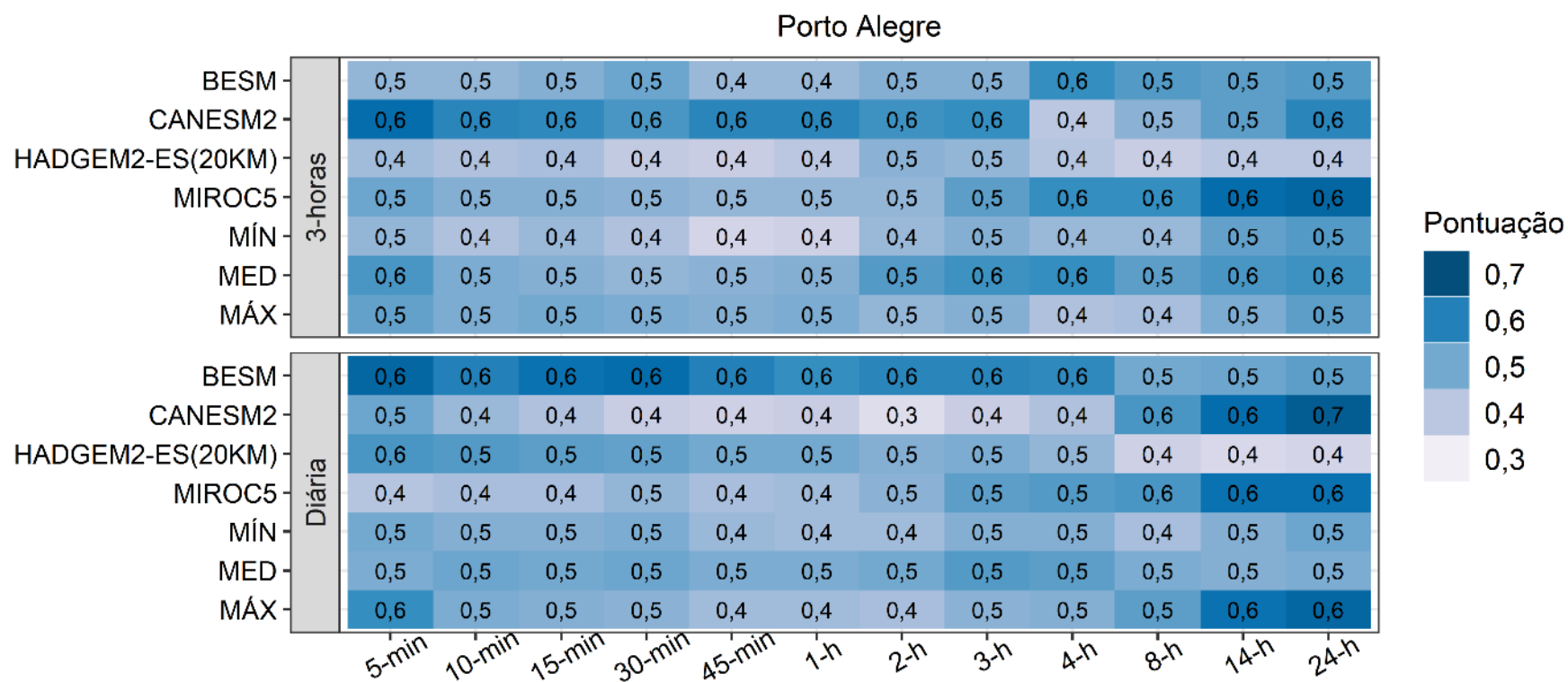


Figura 6-3. Pontuação de Taylor para séries simuladas com viés corrigido – estação Porto Alegre.

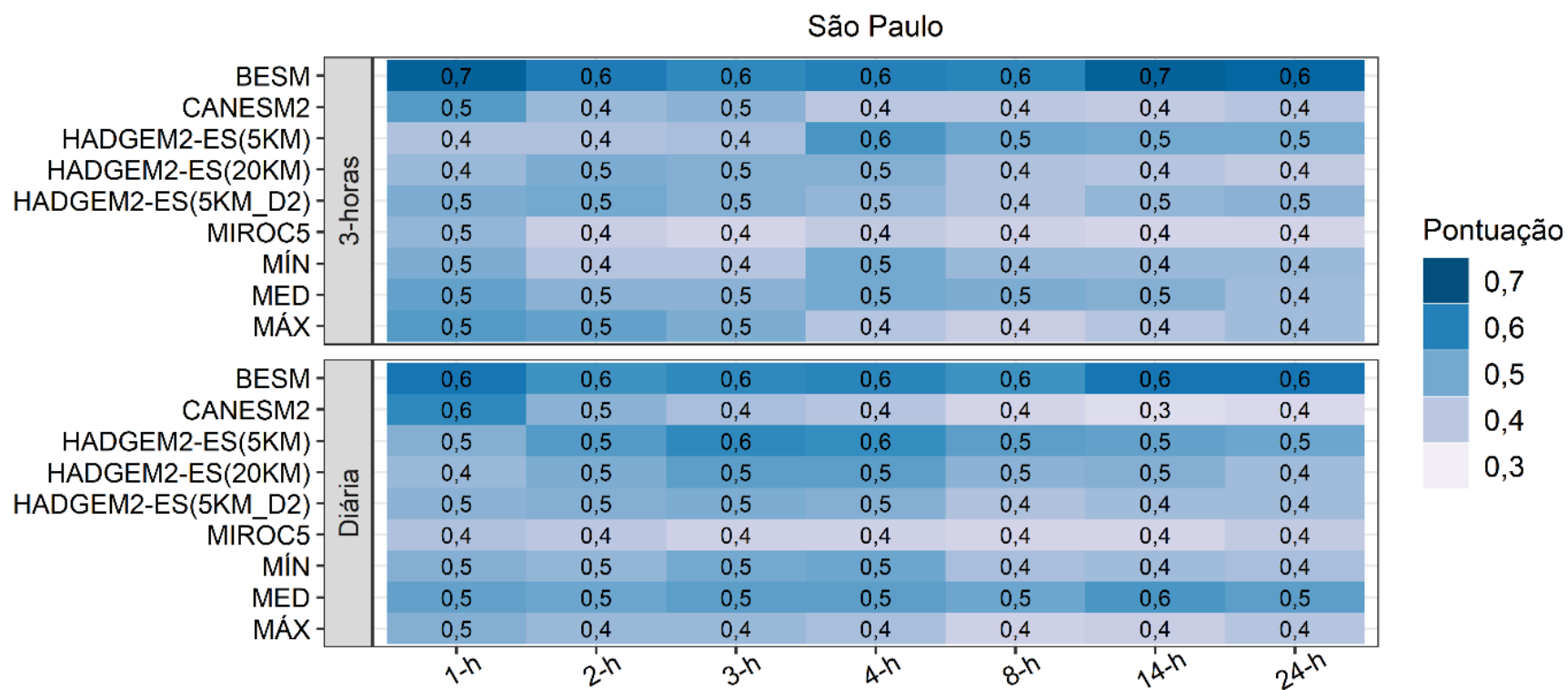


Figura 6-4. Pontuação de Taylor para séries simuladas com viés corrigido – estação São Paulo.

6.2.3 Expectativas de Mudanças do Clima

Nesta seção, foram analisadas as expectativas de mudanças climáticas para os locais em estudo. Essa análise foi baseada exclusivamente nos dados simulados de precipitação provenientes dos modelos climáticos (resolução 3-horas e Diária), com o objetivo de observar a direção de mudança do clima no futuro, em comparação ao período histórico. Essa verificação foi realizada com base na intensidade de precipitação estimada para os diferentes tempos de retorno.

Para a estação Porto Alegre, a Figura 6-5 apresenta as tendências de mudança segundo os cenários analisados. Para resolução temporal 3-horas, a intensidade de precipitação para os cenários futuros apresentou gradativa diferença em relação ao período histórico; enquanto entre os cenários futuros, os resultados para o RCP 4.5 e 8.5 conduziram a valores próximos, para baixo tempo de retorno (e.g., 2 e 5 anos), e maiores diferenças para os altos tempos de retorno (e.g., 50 e 100 anos). Para a resolução temporal Diária, o comportamento é semelhante aos observados para a resolução temporal 3-horas. Os resultados indicaram que, para ambas as resoluções temporais, os modelos climáticos apresentaram uma expectativa de aumento das precipitações intensas.

Para a estação São Paulo, observa-se na Figura 6-6 que as tendências de precipitações intensas não seguem mesmo padrão para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5. Para resolução temporal 3-horas, o cenário RCP 4.5 aparece produzindo maiores intensidades de precipitação que para o cenário 8.5; e para baixo tempo de retorno (e.g., 2 anos), resultados para o RCP 8.5 se mostraram inferiores ao período histórico, indicando redução nas precipitações intensas. Para resolução temporal Diária, os resultados para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 se apresentaram similares. Para ambas as resoluções temporais, apenas para tempos de retorno superior a 5 anos os resultados dos cenários se sobrepuseram ao período histórico.

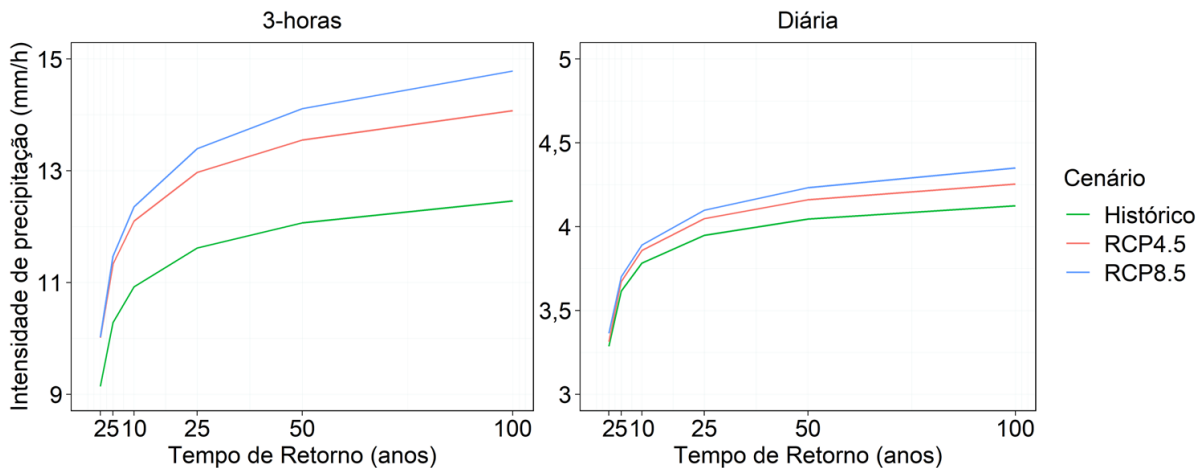


Figura 6-5. Expectativas do comportamento da intensidade de precipitação para os diferentes cenários, para a estação Porto Alegre.

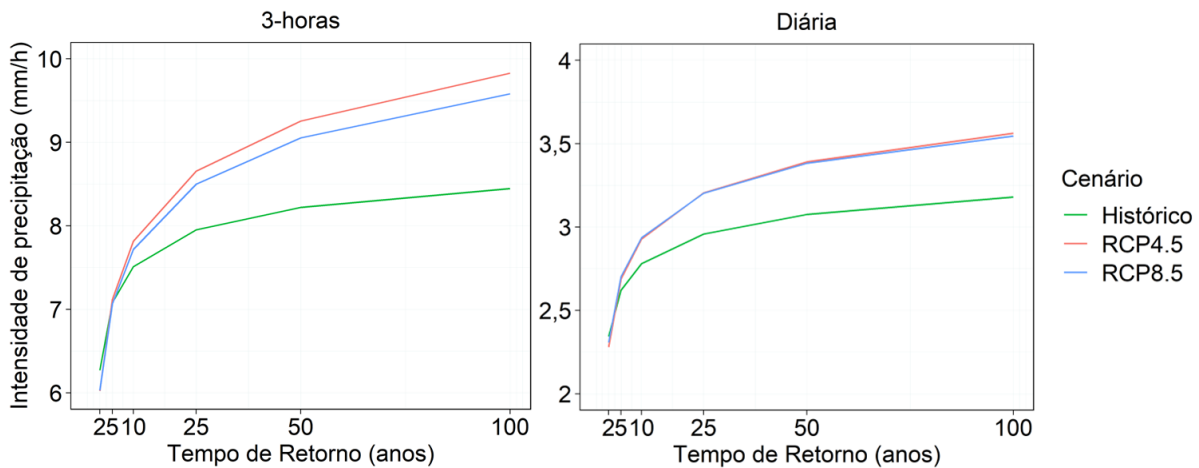


Figura 6-6. Expectativas do comportamento da intensidade de precipitação para os diferentes cenários, para a estação São Paulo.

6.3 Impactos das Mudanças Climáticas em Curvas IDF

Nesta seção serão apresentados os resultados decorrentes da geração de curvas IDF no período futuro. Para tal, e para fins de comparação, foram produzidas curvas IDF no futuro considerando as duas abordagens: (i) estacionária (método EQM), em que há modelagem estatística estacionária nas séries de precipitações máximas anuais nos períodos histórico e futuro; e (ii) não-estacionária (método EQM_{NS}), em que há modelagem estatística não-estacionária nas séries de precipitações máximas anuais nos períodos histórico e futuro, mediante avaliação. Por fim, os resultados foram analisados sob diferentes aspectos, utilizando-se de métricas geralmente conhecidas para comunicar risco hidrológico associado a eventos de chuvas intensas. Sendo assim, os eventos intensos no período futuro são aqui

apresentados em termos de: (i) tendências associadas ao período futuro; (ii) intensidade de precipitação (curvas IDF); (iii) mudança relativa; e (iv) tempo de retorno ou probabilidade de excedência.

6.3.1 Análise de tendências associadas às séries de precipitações máximas anuais futuras

Utilizando o método EQM_{NS}, séries futuras de precipitações máximas anuais foram estimadas. As estimativas foram realizadas para o horizonte de 2099. Às séries futuras, foram ajustados modelos de distribuição de GEV, de maneira análoga às séries de precipitações máximas anuais observadas. Foram ajustados 01 modelo estacionário e 05 modelos não-estacionários, permitindo analisar qual modelo melhor se ajusta aos dados, trazer menção a possíveis tendências e orientar na geração de curvas IDF adaptadas ao futuro.

Os resultados de avaliação de diferentes modelos de GEV às séries de precipitações máximas anuais futuras para a estação de Porto Alegre e São Paulo são apresentados no Apêndice III.

De acordo com os resultados do método CIAc, observa-se variação entre os modelos ranqueados para os diferentes produtos climáticos. Para a estação de Porto Alegre, os modelos GEV-I, GEV-II, GEV-III se apresentaram como superiores estatisticamente, dados os valores de p estimados, variando de acordo com a duração da precipitação e tipo de produto climático (cenário RCP e resolução temporal). No caso de Porto Alegre (RCP 4.5 Diária), nenhum modelo não-estacionário se mostrou superior ao modelo estacionário. Para Porto Alegre (RCP 4.5 3-horas), os menores valores de p indicaram que, para precipitações futuras de duração inferior a 3-h, GEV-III se apresentou como melhor modelo, enquanto o modelo estacionário se mostrou superior para as demais durações. Para os produtos de RCP 8.5, o modelo GEV-II apresentou-se superior para Porto Alegre (RCP 8.5 Diária), enquanto para Porto Alegre (RCP 8.5 3-horas), o modelo GEV-III se mostrou superior para precipitações de duração até 3 h e o modelo GEV-II se mostrou superior para precipitações de demais durações. Os resultados aqui reportados para a estação de Porto Alegre indicam que, mesmo que no período histórico não tenham sido encontradas tendências significativas de aumento de eventos intensos de precipitação, a maioria das projeções climáticas para essa estação sugere tendências de aumento dos

eventos intensos no futuro, embora com certa variabilidade entre os diferentes produtos. Estes resultados alertam para uma tendência em potencial associada aos padrões de precipitações futuras, em decorrência dos efeitos das mudanças climáticas na forma de RCPs.

Para a estação de São Paulo, os resultados do método CIAc indicaram que os modelos GEV-I, GEV-II e GEV-IV se apresentam como melhor para o ajuste dos dados. Contudo, de acordo com os resultados do teste de significância estatística aplicado às séries futuras, observa-se que nenhum modelo não-estacionário aplicado às estatísticas associadas aos dados futuros para estação São Paulo, independente do RCP e resolução temporal, apresentou superioridade em relação ao modelo estacionário. Este comportamento difere daquele observado no período histórico, sugerindo que, no futuro, haveria uma manutenção das características dos eventos intensos em relação à magnitude e frequência.

6.3.2 Curvas IDF adaptadas

6.3.2.1 Estação 8^o DISME – Porto Alegre

As tendências avaliadas para as séries de precipitações máximas anuais futuras, obtidas a partir da mediana dos modelos climáticos, para a estação de Porto Alegre revelaram comportamento não-estacionário para a maioria das durações. Os resultados da análise de tendência foram utilizados para estimar quantis de precipitação e conseqüentemente, adaptar as curvas IDF. IDFs estacionárias e não-estacionárias para todos os cenários são apresentados na Figura 6-7, e os parâmetros das equações são apresentados na Tabela 6-10, quando do uso do método EQM, e Tabela 6-11 quando do uso do método EQM_{NS}. Para as IDFs não-estacionárias, adotou-se o ano 2099 como horizonte.

De acordo com as curvas apresentadas, as IDFs não-estacionárias se sobrepõem às IDFs estacionárias, para a maioria das durações, indicando que a não-estacionariedade associada sugere a ocorrência de aumento das precipitações intensas. Essas diferenças se mostram mais expressivas para os produtos de resolução temporal 3-horas que para aqueles de resolução Diária. No geral, o uso da abordagem não-estacionária se manifesta mais conservadora, por produzir chuvas mais intensas, que a abordagem estacionária, especialmente para eventos de pequena duração.

Quanto aos cenários de mudanças do clima, as estimativas de precipitação para o RCP 8.5 são superiores às para o RCP 4.5, principalmente quando a abordagem não-estacionária é utilizada.

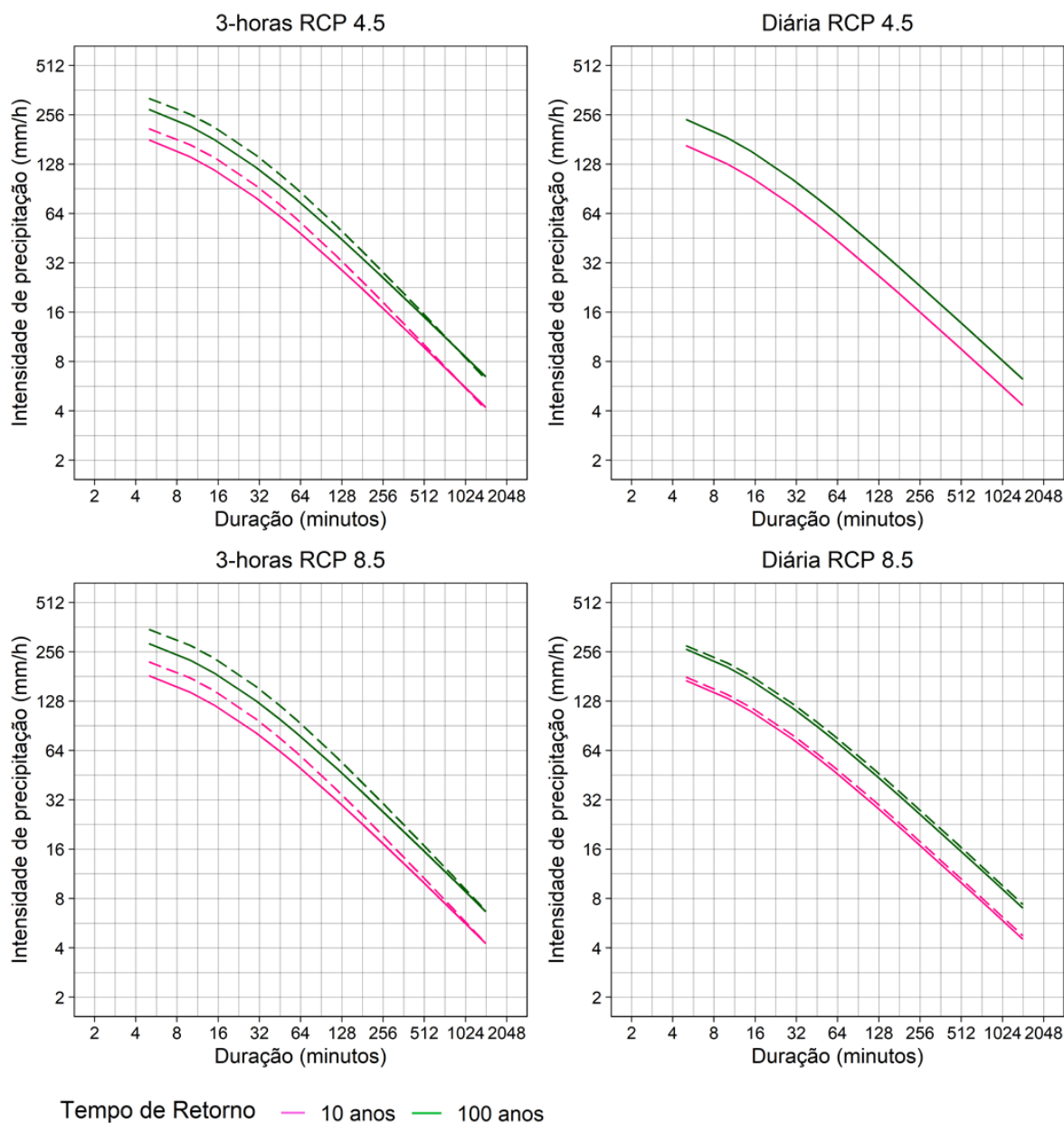


Figura 6-7. Curvas IDF futuras para estação de Porto Alegre para os tempos de retorno de 10 e 100 anos. As linhas contínuas se referem à adoção do método estacionário (EQM), enquanto as linhas tracejadas se referem à adoção do método não-estacionário (EQM_{NS}).

Tabela 6-10. Parâmetros das equações IDF para Porto Alegre, período futuro (2099), utilizando EQM.

Porto Alegre	Coeficientes*				Estatísticas**	
	a	b	c	d	RQME (mm/h)	DPMA (%)
RCP 4.5 (3-horas)	1.063,46	0,186	9,773	0,819	6,17	6,50
RCP 4.5 (Diária)	800,86	0,160	7,517	0,768	5,21	5,70
RCP 8.5 (3-horas)	1.118,17	0,195	10,327	0,827	6,43	6,58
RCP 8.5 (Diária)	805,19	0,190	8,077	0,772	5,71	5,50

*a,b,c,d são os coeficientes da IDF, conforme formulação da Equação (3-3).

**RQME é a raiz do quadrado médio do erro, e DPMA é o desvio percentual médio absoluto.

Tabela 6-11. Parâmetros das equações IDF para Porto Alegre, período futuro (2099), utilizando EQM_{NS}.

Porto Alegre	Coeficientes*				Estatísticas**	
	a	b	c	d	RQME (mm/h)	DPMA (%)
RCP 4.5 (3-horas)	1.761,10	0,185	12,428	0,891	8,10	8,48
RCP 4.5 (Diária)	799,33	0,160	7,485	0,768	5,23	5,70
RCP 8.5 (3-horas)	1,783,35	0,198	12,257	0,892	8,91	8,70
RCP 8.5 (Diária)	876,67	0,192	8,555	0,778	6,25	5,47

*a,b,c,d são os coeficientes da IDF, conforme formulação da Equação (3-3).

**RQME é a raiz do quadrado médio do erro, e DPMA é o desvio percentual médio absoluto.

6.3.2.2 Estação IAG-USP – São Paulo

Ao contrário do que foi observado para a estação de Porto Alegre, as tendências avaliadas para a estação de São Paulo no período futuro revelaram um comportamento estacionário por parte das séries de precipitações máximas anuais futuras. Dessa forma, nenhuma tendência foi associada e a modelagem estatística estacionária foi aplicada para as séries futuras e posterior geração de IDFs adaptadas. Em outras palavras, para São Paulo, o método EQM_{NS} foi aplicado e somente as séries de precipitações máximas anuais foram ajustadas à modelagem não-estacionária. A Figura 6-8 apresenta as curvas IDF adaptadas para todos os cenários. Na Tabela 6-12 são indicados os coeficientes estimados para as curvas utilizando o método EQM, e na Tabela 6-13 os coeficientes estimados utilizando o método EQM_{NS}. O Apêndice III-D apresenta as intensidades de precipitação futuras obtidas.

Apesar das precipitações intensas no período futuro terem sido produzidas por meio de modelagem estatística estacionária, observa-se que as curvas IDF adaptadas utilizando o método EQM_{NS} produzem intensidade de precipitação superior às das

curvas IDF estacionárias, adaptadas utilizando o método EQM. Essa constatação ocorre para todos os cenários e resolução temporal avaliados, e isso ocorre devido à verificação de tendências associadas às séries históricas e uso de modelagem não-estacionária na correção de viés. De qualquer maneira, é visível o poder da tendência histórica na adaptação de IDF's no futuro. Por exemplo, a IDF futura estimada pelo EQM para o tempo de retorno de 100 anos muito se aproxima da IDF futura de tempo de retorno de 50 anos, estimada pelo EQM_{NS} (ver Apêndice III-D). Entre os cenários de emissão, não se observa diferença expressiva, e os resultados obtidos para o RCP 4.5 são similares aos obtidos para o RCP 8.5.

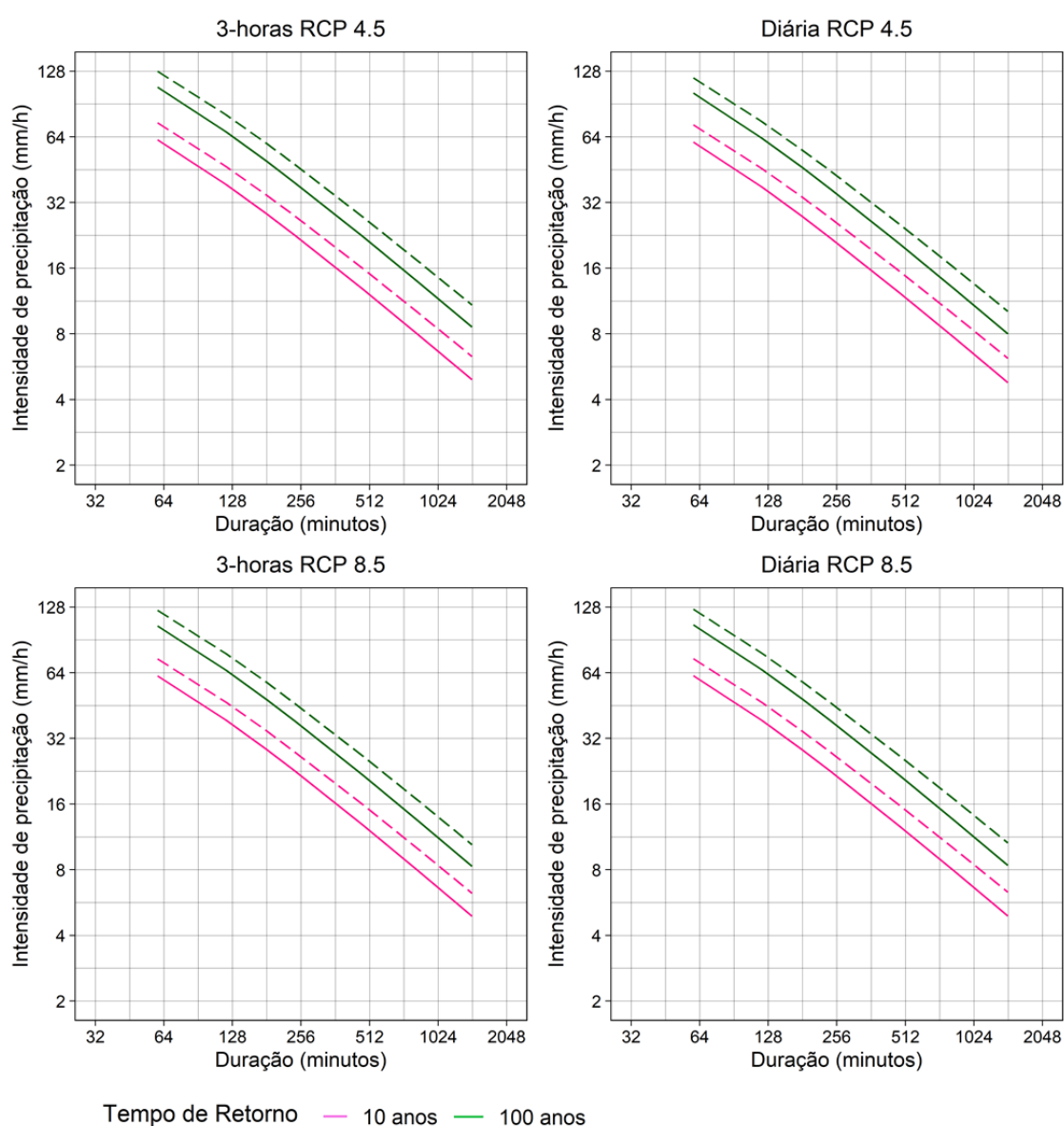


Figura 6-8. Curvas IDF futuras para estação de São Paulo. As linhas contínuas se referem à adoção do método estacionário (EQM), enquanto as linhas tracejadas se referem à adoção do método não-estacionário (EQM_{NS}), para diferentes tempos de retorno.

Tabela 6-12. Parâmetros das equações IDF para São Paulo, período futuro (2099), utilizando EQM.

São Paulo	Coeficientes*				Estatísticas**	
	a	b	c	d	RQME (mm/h)	DPMA (%)
RCP 4.5 (3-horas)	1.911,09	0,241	26,143	0,893	1,92	3,76
RCP 4.5 (Diária)	1.948,24	0,223	25,824	0,895	2,09	3,92
RCP 8.5 (3-horas)	2.103,36	0,229	28,566	0,904	1,62	3,50
RCP 8.5 (Diária)	2.008,68	0,232	26,821	0,899	2,05	3,69

*a,b,c,d são os coeficientes da IDF, conforme formulação da Equação (3-3).

**RQME é a raiz do quadrado médio do erro, e DPMA é o desvio percentual médio absoluto.

Tabela 6-13. Parâmetros das equações IDF para São Paulo, período futuro (2099), utilizando EQM_{NS}.

São Paulo	Coeficientes*				Estatísticas**	
	a	b	c	d	RQME (mm/h)	DPMA (%)
RCP 4.5 (3-horas)	2.061,66	0,236	25,816	0,869	2,12	4,31
RCP 4.5 (Diária)	2.123,18	0,216	26,077	0,870	2,35	4,54
RCP 8.5 (3-horas)	2.229,30	0,223	27,179	0,876	1,76	4,02
RCP 8.5 (Diária)	2.039,16	0,226	24,450	0,864	2,30	4,35

*a,b,c,d são os coeficientes da IDF, conforme formulação da Equação (3-3).

**RQME é a raiz do quadrado médio do erro, e DPMA é o desvio percentual médio absoluto.

6.3.3 Mudança Relativa

Obtidas as curvas IDF adaptadas para o futuro, calculou-se a mudança da intensidade de precipitação no período futuro em relação à intensidade de precipitação no período histórico. Para apresentação dos resultados, foram utilizados mapas de calor para os diferentes cenários de emissão (RCP 4.5 e 8.5), metodologia de geração de IDF aplicada (Estacionária – EQM e Não-Estacionária - EQM_{NS}) e resoluções temporais dos modelos climáticos (3-horas e Diária).

6.3.3.1 Estação 8^o DISME – Porto Alegre

Mapas de calor foram construídos para representar a mudança relativa estimada para a estação de Porto Alegre. A Figura 6-9 apresenta os resultados de mudança relativa decorrente do uso do método EQM para geração de IDFs futuras, enquanto a Figura 6-10 os resultados decorrentes do uso do método EQM_{NS} para geração de IDF futuras. Observa-se que as mudanças relativas estimadas a partir das IDFs futuras obtidas pelo método EQM_{NS} são mais intensas que as obtidas pelo

método EQM, mais uma vez indicando o poder da não-estacionariedade no incremento da intensidade das curvas IDF.

O padrão da mudança para a estação de Porto Alegre difere entre as resoluções temporais do modelo. Os resultados de resolução 3-horas apresentam um padrão similar entre as durações e cenários, com mudança expressiva para eventos de pequena duração, atingindo um aumento de até 23%, considerando o método EQM, e 50% considerando o método EQM_{NS}, para o cenário crítico (RCP 8.5). Por outro lado, os resultados produzidos com resolução Diária quase não apresentaram mudança relativa para o RCP 4.5, e um padrão de aumento gradual de precipitações intensas de acordo com o aumento do tempo de retorno para o RCP 8.5.

Os resultados também indicaram que os eventos de longa duração, a exemplo dos eventos de 24 horas, possuem menor grau de mudança, mesmo para abordagem não-estacionária. Esses valores são particularmente importantes porque os eventos intensos de pequena duração são mais relevantes para bacias hidrográficas de pequenas proporções.

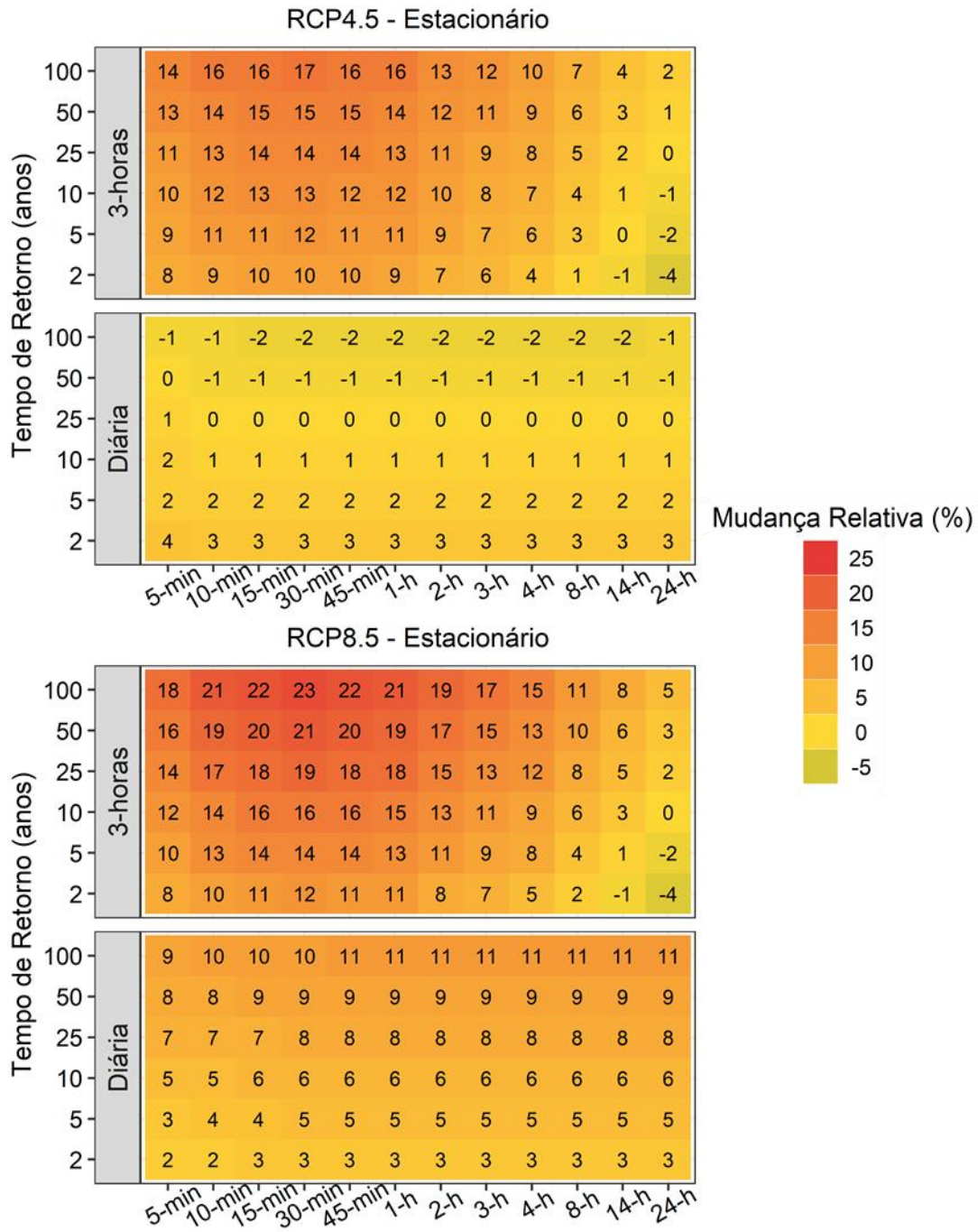


Figura 6-9. Mudança relativa, em porcentagem, da intensidade de precipitação para diferentes tempos de retorno utilizando o método EQM, para estação de Porto Alegre.

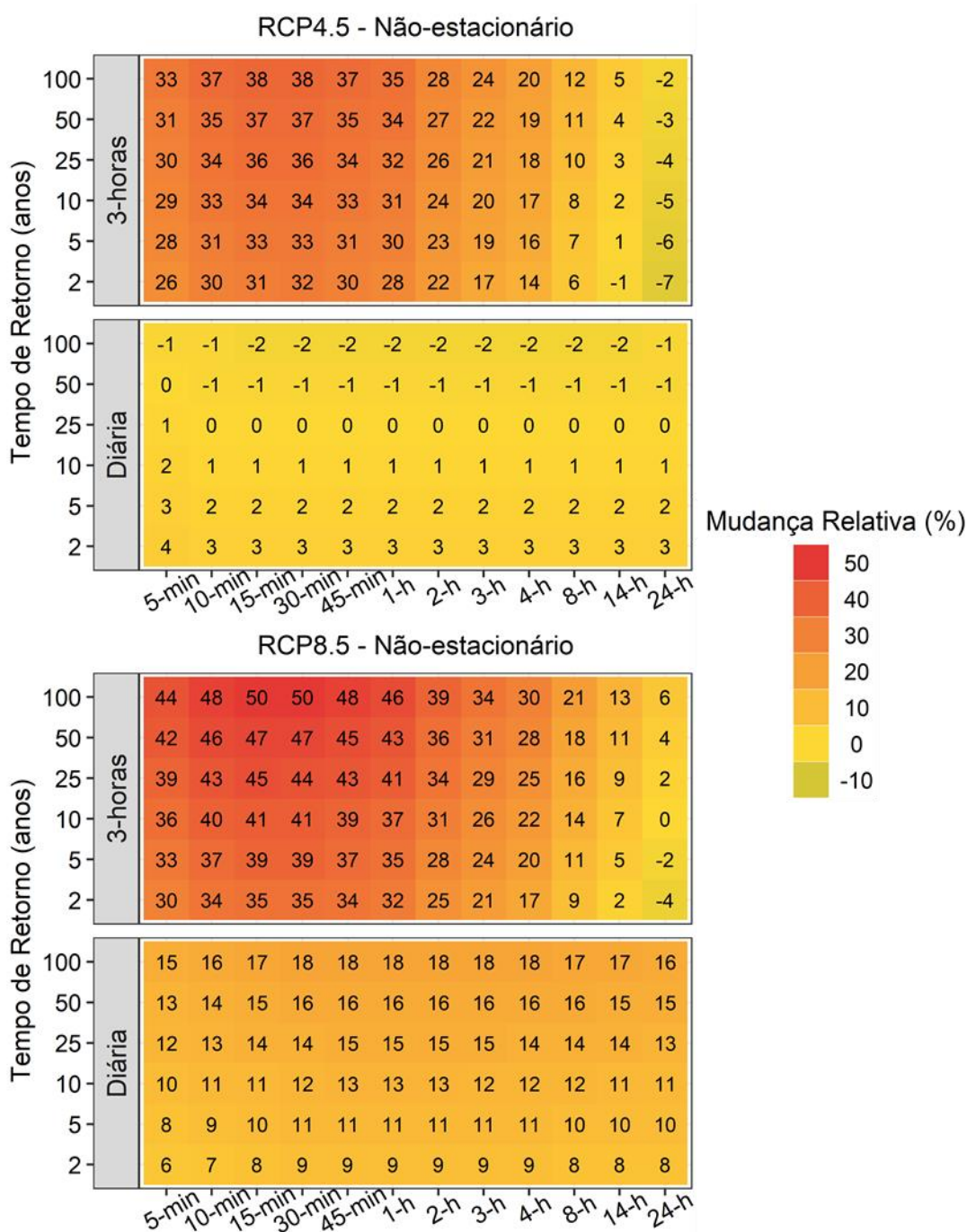


Figura 6-10. Mudança relativa, em porcentagem, da intensidade de precipitação para diferentes tempos de retorno utilizando o método EQM_{NS}, para estação de Porto Alegre.

6.3.3.2 Estação IAG-USP – São Paulo

De maneira análoga, mapas de calor foram produzidos para representar as mudanças de intensidade de precipitação no período futuro relativa ao período histórico para a estação de São Paulo. A Figura 6-11 apresenta os resultados obtidos utilizando o método EQM e a Figura 6-12 os resultados utilizando o método EQM_{NS}.

Comparando os métodos de geração de IDFs futuras, o método estacionário diverge do não-estacionário, e este último apresenta mudanças mais significativas no futuro. Por exemplo, mudanças relativas alcançaram o nível de 22% (abordagem estacionária) e 44% (abordagem não-estacionária), considerando eventos de 1 h de duração e 100 anos de tempo de retorno. A discrepância é ainda maior para os eventos raros. Em observação à resolução temporal, as diferenças se apresentam mais expressivas para o cenário RCP 4.5 que para o RCP 8.5.

Um aumento na intensidade da precipitação é estimado para a maioria dos casos. Entretanto, usando a abordagem estacionária, uma estimativa de redução é indicada para eventos frequentes de longa duração, mascarando a tendência associada a esses eventos. Para eventos de longa duração, tendências negativas já haviam sido observadas por Lyra *et al.* (2017), usando o modelo Eta-HADGEM-ES para a região de São Paulo. Dessa forma, a abordagem não-estacionária aparece como necessária e relevante, pois a abordagem estacionária é capaz de mascarar a direção da mudança.

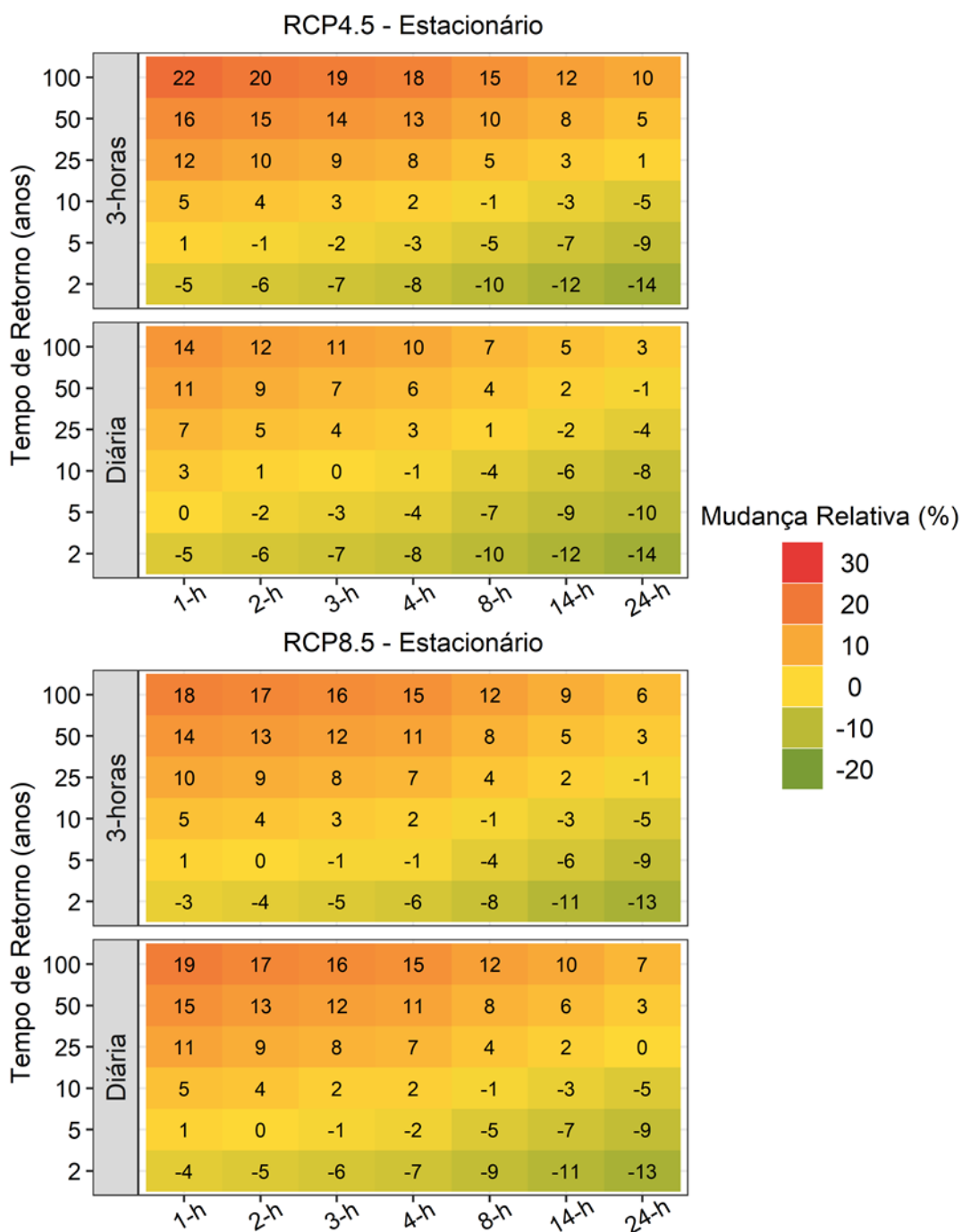


Figura 6-11. Mudança relativa, em porcentagem, da intensidade de precipitação para diferentes tempos de retorno utilizando o método estacionário EQM, para estação de São Paulo.

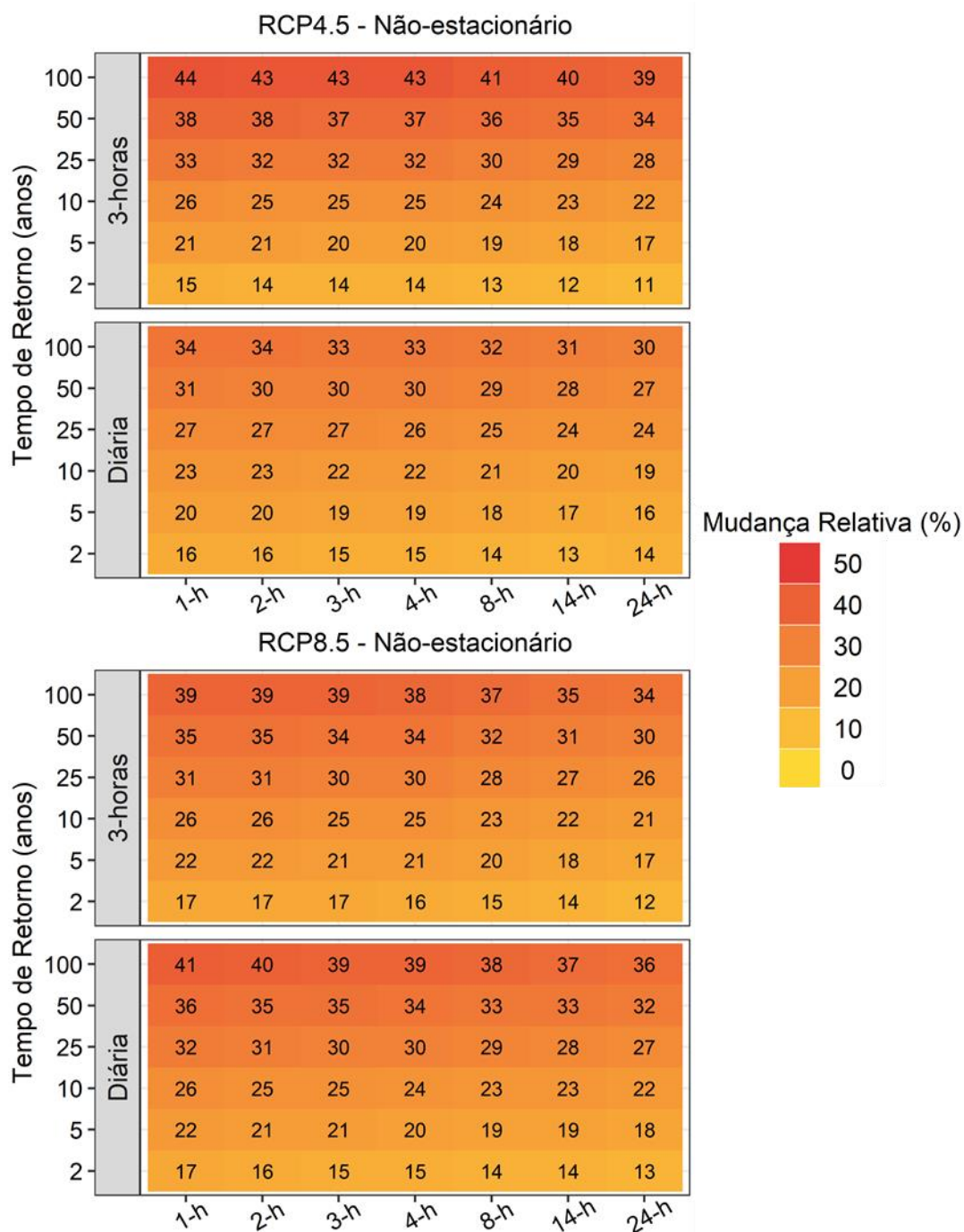


Figura 6-12. Mudança relativa, em porcentagem, da intensidade de precipitação para diferentes tempos de retorno utilizando o método não-estacionário EQM_{NS}, para estação de São Paulo.

6.3.4 Probabilidade de Excedência

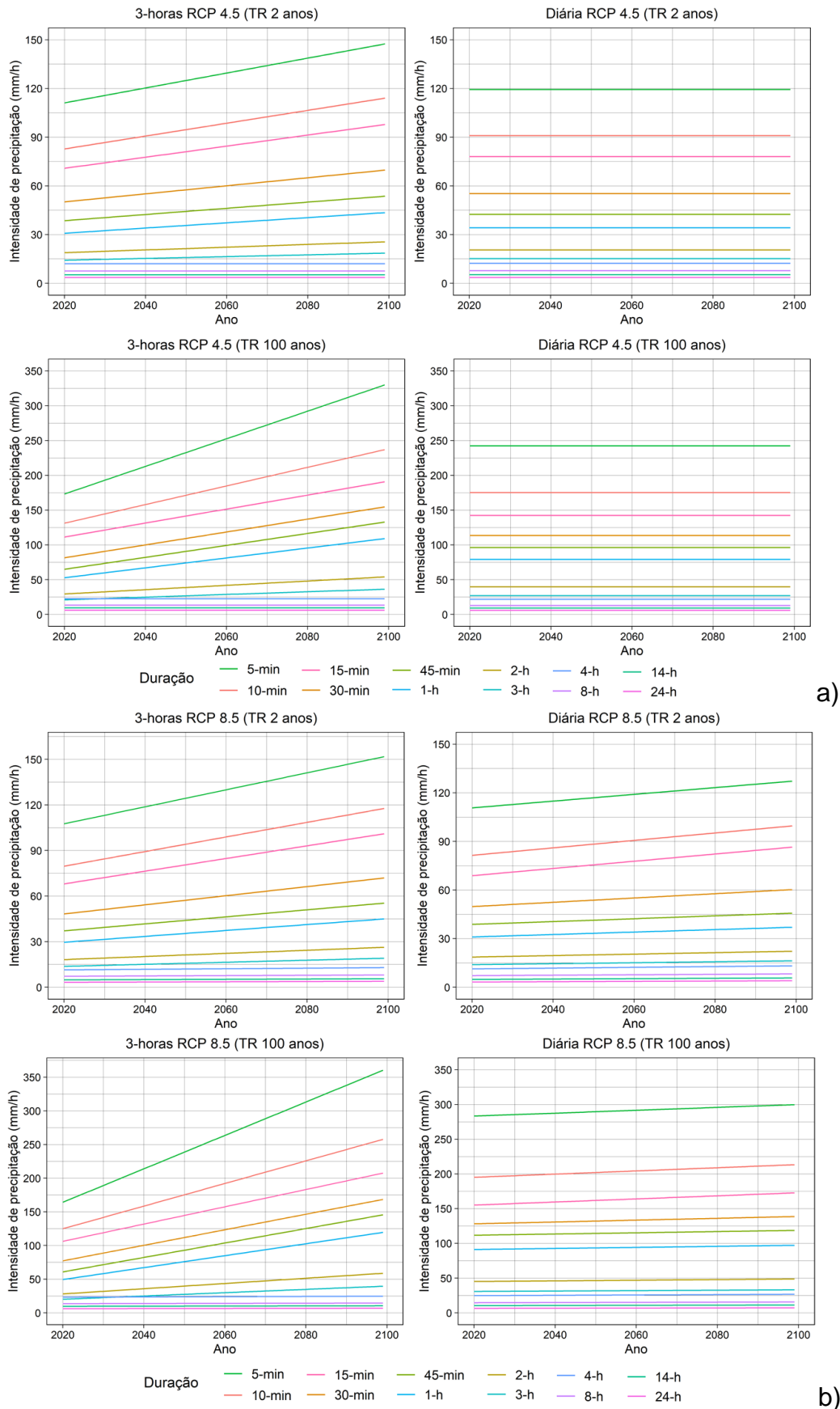
As estimativas de intensidade da precipitação no futuro foram realizadas a partir da geração de IDFs adaptadas para diferentes cenários e abordagens. De modo a analisar os efeitos da mudança do clima na frequência dos eventos, estimou-se o tempo de retorno futuro associado a eventos de precipitações intensas no período

histórico. Foram utilizadas as magnitudes dos eventos específicos de (i) 1 h e 10 anos de tempo de retorno, e (ii) 24 h e 100 anos de tempo de retorno, para determinar as expectativas destes eventos em relação ao futuro.

Para a estação de Porto Alegre, os resultados indicam comportamento não-estacionário no período futuro para a maioria dos casos avaliados. Para representar as tendências associadas às séries futuras ao longo do século, a Figura 6-13 apresenta como as tendências interferem na intensidade de precipitação para o mesmo risco hidrológico associado, conforme sugerido por Ouarda, Yousef e Charron (2018). Para esta análise, foram adotados os eventos frequentes (a exemplo daqueles com tempos de retorno de 2 anos), e eventos raros (a exemplo daqueles com tempos de retorno de 100 anos).

Tendência de aumento nas intensidades de precipitação no futuro, em comparação ao período histórico, são observadas na maioria dos casos, e em um maior grau para eventos de pequena duração. Por exemplo, para os eventos provenientes do RCP 4.5 (3-horas), 5 min de duração e 100 anos de tempo de retorno, a intensidade de precipitação varia de 175 mm/h em 2020 até 325 mm/h em 2099. Esses valores representam um aumento de aproximadamente 86% em 80 anos. Como era de se esperar, observa-se também que o uso da resolução temporal de 3-horas resulta em tendências mais fortes que as resultantes da resolução temporal Diária, em que nenhuma tendência é apresentada para RCP 4.5.

Adotando-se como exemplo os eventos de 1 h e 10 anos de tempo de retorno e 24 h e 100 anos de tempo de retorno, os tempos de retorno futuros foram estimados com base no horizonte de 2099, conforme apresentado na Tabela 6-14. Para este cenário, é esperado que o tempo de retorno de 100 anos reduza para 46 anos até o final do século, e redução entre 02 e 05 vezes para o tempo de retorno de 10 anos. Esses resultados são particularmente preocupantes, pois os eventos desta magnitude tendem a superar a capacidade de condução dos atuais sistemas de drenagem urbana. Em outras palavras, os sistemas tenderão a falhar com maior frequência em Porto Alegre.



a)

b)

Figura 6-13. Variação da intensidade de precipitação futura para a estação de Porto Alegre e tempo de retorno de 2 anos e 100 anos, adotando abordagem não-estacionária: a) RCP 4.5 e b) RCP 8.5.

Tabela 6-14. Tempos de retorno no futuro (ano 2099) associado a intensidade de eventos no período histórico para a estação de Porto Alegre.

Método		Evento	1 h e 10 anos	24 h e 100 anos
Estacionário (EQM)	RCP 4.5	3-horas	5	91
		Diária	9	110
	RCP 8.5	3-horas	5	77
		Diária	7	59
Não-estacionário (EQM _{NS})	RCP 4.5	3-horas	2	111
		Diária	9	110
	RCP 8.5	3-horas	2	74
		Diária	5	46

A Tabela 6-15 apresenta os tempos de retorno, no futuro, associados aos eventos de precipitações intensas no período histórico, para a estação de São Paulo. Os resultados indicaram um suave aumento na frequência do evento de 1 h e 10 anos de tempo de retorno, para a abordagem estacionária. Para a abordagem não-estacionária, estima-se que este evento se apresentará ainda mais frequente. Por exemplo, no período histórico, espera-se que esse evento ocorra, em média, 1 vez a cada 10 anos; entretanto, a abordagem não-estacionária indica que esse mesmo evento ocorreria, no futuro, em média, 1 vez a cada 4 anos. Similarmente, observa-se um aumento na frequência do evento de 24 h e 100 anos de tempo de retorno, frequência essa mais significativa na abordagem não-estacionária. Esses resultados elucidam que direta adoção de projeções climáticas sem a devida análise de tendências associadas podem subestimar significativamente os eventos intensos e afetar diretamente o dimensionamento de estruturas de escoamento e outros elementos de planejamento.

Os valores da Tabela 6-15 foram estimados ao comparar-se as IDFs futuras com as IDFs históricas. Contudo, a comparação foi realizada com base na ausência de tendências associadas aos eventos históricos, ou seja, IDFs históricas estacionárias. Para a abordagem do modelo EQM_{NS}, os tempos de retorno estimados no futuro se mantiveram similares aqueles observados para as IDFs históricas não-estacionárias. Esses resultados indicam que IDFs históricas não-estacionárias são capazes de abranger futuras mudanças na precipitação (AGILAN; UMAMAHESH, 2016). Porém, entende-se que essa observação é pontuada para o caso desta estação, e seriam necessárias mais investigações que corroborassem tal afirmação.

Tabela 6-15. Tempos de retorno no futuro (ano 2099) associado a intensidade de eventos no período histórico para a estação de São Paulo (IDF histórica estacionária).

Método	Evento	1 h e 10 anos	24 h e 100 anos
Estacionário (EQM)	RCP 4.5	3-horas	8
		Diária	9
	RCP 8.5	3-horas	8
		Diária	9
Não-estacionário (EQM _{NS})	RCP 4.5	3-horas	4
		Diária	4
	RCP 8.5	3-horas	4
		Diária	4

6.3.5 Análise de incertezas

O uso de modelos de distribuição de probabilidade na estimativa de precipitações intensas acarreta a produção de incertezas que são intrínsecas ao próprio modelo e os métodos de estimativa dos parâmetros utilizados. A adoção de modelos não-estacionários, no entanto, embora por vezes produza melhores ajustes aos dados, adiciona complexidade ao processo de cálculo, o que leva a um aumento das incertezas a ele associadas.

De modo a comparar as incertezas decorrentes do processo de estimativa das precipitações intensas, foram produzidos os intervalos de confiança (IC) de 95% decorrentes para: (i) IDF's históricas estacionárias, prática usual; (ii) IDF's adaptadas ao futuro considerando o método EQM; e (iii) IDF's adaptadas ao futuro considerando o método EQM_{NS}. As Figuras abaixo apresentam os intervalos de confiança estimados para os eventos de precipitação intensa de durações iguais a 1 h e 24 horas.

Os resultados para a estação Porto Alegre são apresentados na Figura 6-14 e Figura 6-15. Observa-se que não existe um comportamento similar em todos os casos apresentados e, na grande maioria deles, o intervalo de incertezas produzido no período histórico se sobrepõe aos intervalos de incertezas produzidos no período futuro.

Os resultados para a estação São Paulo são apresentados na Figura 6-16 e Figura 6-17. Observa-se, para esta estação, um comportamento similar em todos os casos apresentados. Comparando-se os intervalos de confiança das IDF's históricas e daquelas adaptadas utilizando o método EQM, as incertezas associadas se apresentam bastante próximas, até eventos de aproximadamente, 5 anos de tempo

de retorno. Entretanto, ao comparar os intervalos de confiança das IDFs históricas e daquelas adaptadas utilizando o método EQM_{NS}, nota-se que até eventos de TR 10 anos (precipitação de 1 h) e TR 25 anos (precipitação de 24 h), as incertezas das IDFs históricas não contemplariam às expectativas para o futuro.

Na prática, não é comum a adoção de limites de confiança em estimativas de IDFs para uso em projetos de infraestrutura; no entanto, é importante compreender os riscos associados às mudanças do clima no futuro, principalmente porque não se pode desconsiderar as possibilidades, dado que os preços a serem pagos por ações inadequadas podem ser exorbitantes (COOK; SAMARAS, 2020).

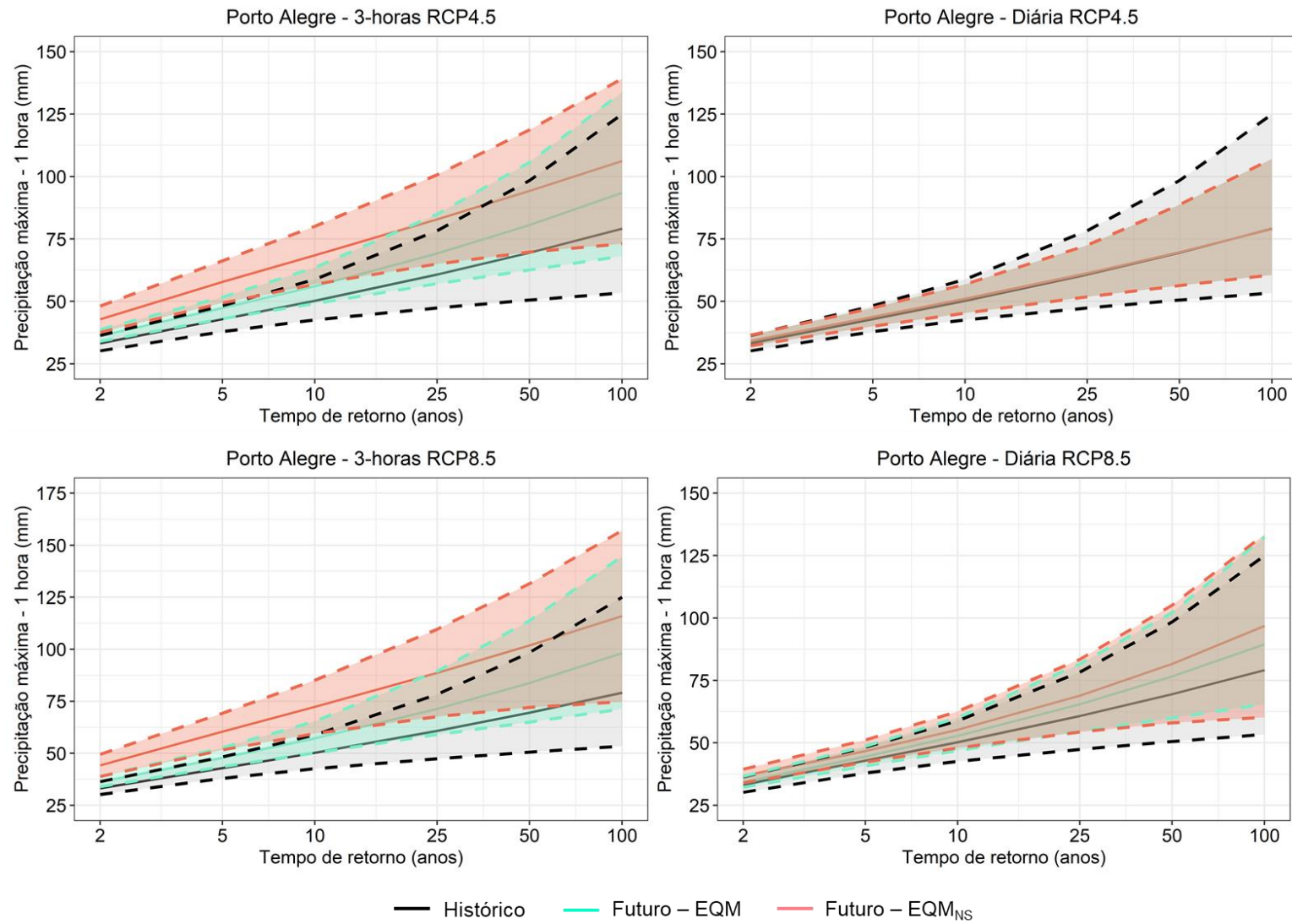


Figura 6-14. Intervalos de confiança de 95% para a estimativa de precipitação de duração 1 h e diferentes tempos de retorno (Porto Alegre).

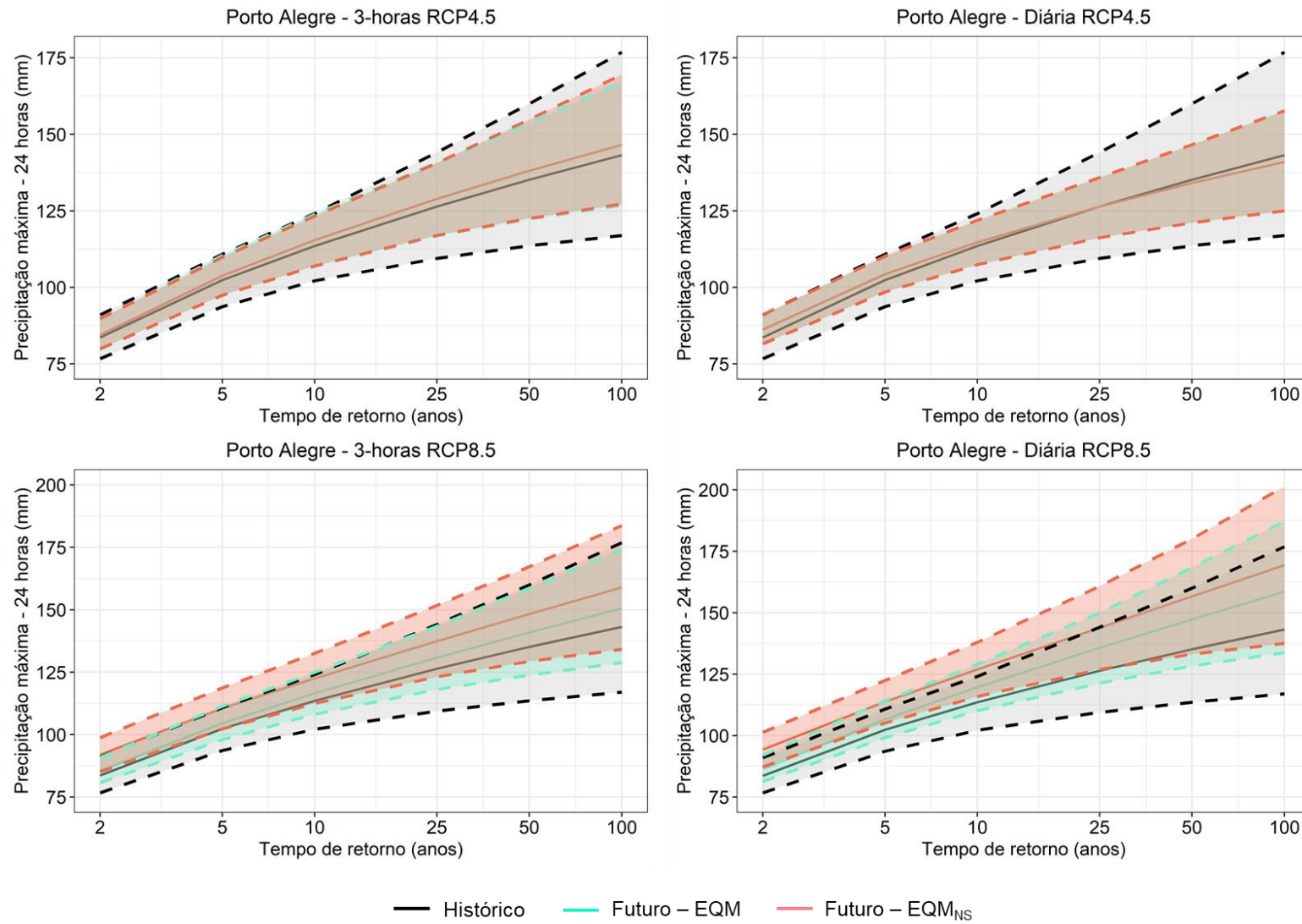


Figura 6-15. Intervalos de confiança de 95% para a estimativa de precipitação de duração 24 h e diferentes tempos de retorno (Porto Alegre).

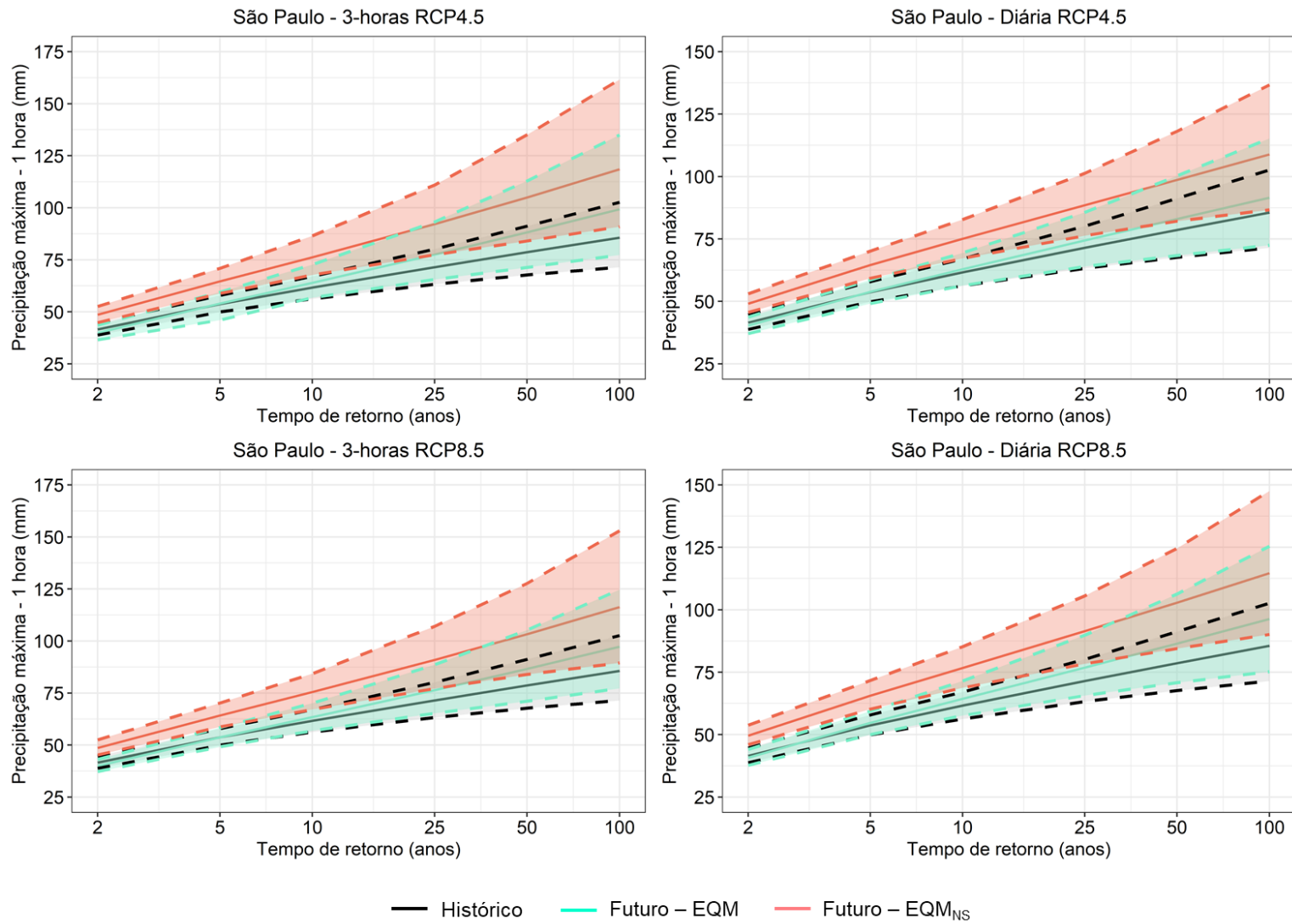


Figura 6-16. Intervalos de confiança de 95% para a estimativa de precipitação de duração 1 h e diferentes tempos de retorno (São Paulo).

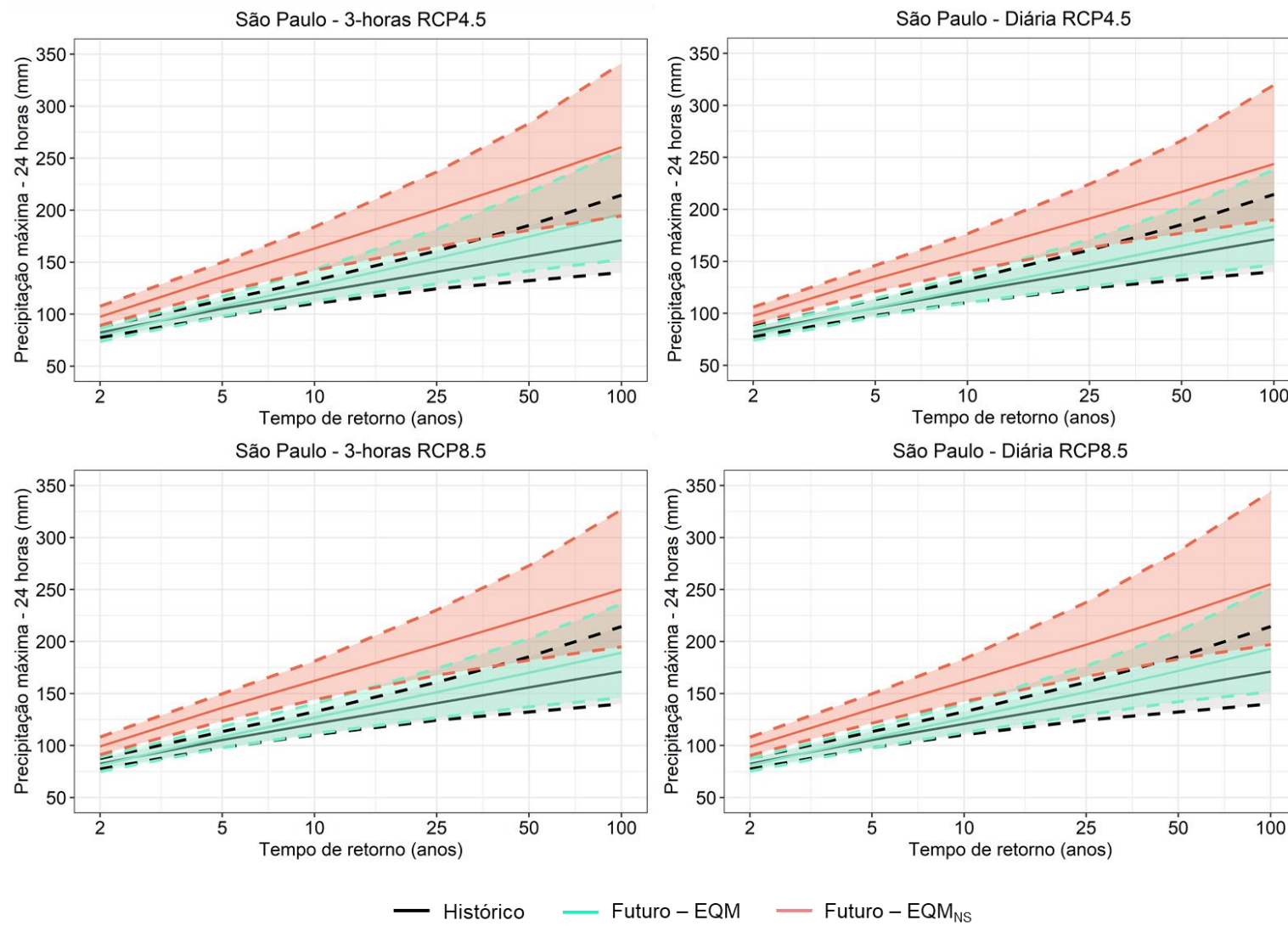


Figura 6-17. Intervalos de confiança de 95% para a estimativa de precipitação de duração 24 h e diferentes tempos de retorno (São Paulo).

7 LIMITAÇÕES E INCERTEZAS

Este trabalho desenvolveu uma metodologia de geração de IDF futuras não-estacionárias sob o efeito de mudanças climáticas. Contudo, algumas limitações devem ser sinalizadas ao desenvolvimento e produção dos resultados apresentados. São elas:

- Aplicação de uma única distribuição de probabilidade e método de estimativa de parâmetros: neste trabalho, utilizou-se a distribuição de GEV e método da Máxima Verossimilhança para análise de frequência das séries de precipitações máximas anuais e consequente estimativa de quantis. Apesar das limitações acerca de uma única distribuição, entende-se que as incertezas associadas à escolha do método de ajuste podem ser equiparadas. No caso da estimativa de parâmetros pelo método MV, a literatura recomenda o uso deste método para séries de dados $n > 25$ anos (KATZ, 2002). Ainda, este trabalho usou-se de análise de aderência dos resultados quando da aplicação do coeficiente de determinação do gráfico Quantil-quantil. A literatura mais recente tem adotado, para finalidade de estimativa de parâmetros de GEV e, por consequência, quantis de precipitação, o uso de Inferência Bayesiana (CHENG; AGHAKOUCHAK, 2014; CHENG *et al.*, 2014), de modo a reduzir às incertezas associadas; contudo, este tipo de abordagem demanda de um razoável custo computacional.
- Uso do tempo como covariante: o tempo foi o covariante adotado para consideração da não-estacionariedade. Embora existam diversos estudos que apontam outros covariantes com ajuste superior ao tempo (AGILAN; UMAMAHESH, 2017; OUARDA, CHARRON; ST-HILAIRE, 2020), inclusive mencionados no decorrer deste trabalho, a adoção de outros covariantes, além do tempo, para fins de análises futuras de mudanças do clima, potencializaria a introdução de incertezas de outras naturezas.
- Uso do modelo climático Eta: o modelo regional Eta foi escolhido para obtenção de produtos climáticos. Embora existam diversos modelos climáticos globais que permitissem o desenvolvimento deste estudo, optou-se por utilizar o modelo Eta dados os mencionados benefícios de

um modelo regional ao invés de um modelo global (*downscaling* dinâmico). Ainda, o uso do modelo Eta para análise de impacto de mudanças climáticas ainda é incipiente, principalmente no tocante às curvas IDF. As simulações do clima incorporadas no modelo Eta estão inerentes aos modelos do CMIP5 e os respectivos RCPs; contudo, o conhecimento acerca da dinâmica do clima, associado às expectativas globais de mudanças, provoca atualizações às projeções climáticas de tempos em tempos.

- Aplicação de metodologia em 2 áreas de estudo: a aplicação do presente estudo foi limitada a 2 áreas, de modo que uma aplicação para diferentes regiões do Brasil permitiria a comparação de diferentes regiões, bem como a associação a outros elementos climáticos e/ou geográficos. Contudo, o acesso às séries históricas representativas e de duração subsidiária ainda é incipiente no Brasil.
- Formulação da Equação IDF: Curvas IDF são representações das relações IDF. Isso porque as curvas são derivadas de equações ajustadas em determinadas formulações e coeficientes, enquanto as relações IDF são diretamente estimadas a partir da análise estatística. Neste trabalho, utilizou-se como base para apresentação dos resultados as equações IDF ajustadas a partir das relações IDF. Apesar das métricas utilizadas para otimizar uma única equação, é comum que haja erros associados, e soluções para redução de erros são, por exemplo: (i) ajuste de múltiplas equações para diferentes durações, e (ii) ajuste de múltiplas equações para diferentes tempos de retorno. Exemplos dessas perspectivas foram utilizados em CPRM (2015) e Silva *et al.* (2021b), respectivamente. Contudo, o uso da perspectiva (i) pode causar descontinuidade no ponto de transição entre as equações, impactando na geração de hidrogramas de projeto (HELPER; DORNELLES; GOLDENFUM, 2017). Para o caso da estação de Porto Alegre, em que futuras IDF foram geradas com base em diferentes configurações não-estacionárias (como exemplo RCP 4.5 3-horas), o uso de uma única equação pode subestimar ou superestimar a real intensidade de precipitação. De qualquer forma, neste estudo, os ajustes de curvas IDF

realizados assumiram um erro máximo de 10% associado (8,7% DPMA – Porto Alegre RCP 8.5 3-horas), o que pode justificar as divergências observadas nos resultados da estação Porto Alegre RCP 4.5.

- Extrapolação das estimativas de precipitações intensas para o futuro para durações diferentes àquelas obtidas pelos produtos climáticos: o modelo EQM/EQM_{NS} utiliza das estatísticas estimadas para as precipitações máximas anuais de diferentes durações no período histórico para extrapolar e, em conjunto às mudanças relativas entre os períodos histórico e futuro, estimar as precipitações máximas anuais no período futuro. Dessa forma, para durações de precipitações no futuro que não foram diretamente produzidas pelos modelos climáticos, a extrapolação realizada para essas durações se mostra como uma incerteza ao método.

8 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

As mudanças do clima trazem consigo uma série de desafios ainda não são totalmente compreendidos ou esperados. No Brasil, apesar de já haver algum conhecimento sobre os efeitos das mudanças do clima, ainda há muito o que se explorar nas diferentes esferas (acadêmica, institucional e técnica) de modo que permita avançar no aumento da resiliência, redução da vulnerabilidade e alcance da adaptação climática.

No que concerne aos eventos intensos de precipitação, os resultados decorrentes da geração de curvas IDF adaptadas para o futuro devido aos efeitos das mudanças climáticas confirmam as expectativas de mudanças nos padrões de precipitações intensas. Contudo, implicações dos efeitos da não-estacionariedade do clima nem sempre são contabilizados, surgindo como uma influência adicional que pode intensificar os efeitos esperados.

O presente trabalho buscou contribuir com uma metodologia de geração de curvas IDF não-estacionárias sob os efeitos de mudanças climáticas. O método desenvolvido baseou-se no EQM de Srivastav, Schardong e Simonovic (2014) e Schardong *et al.* (2018), sendo denominada de EQM_{NS} (SILVA *et al.*, 2021b). Tal metodologia foi capaz de identificar e introduzir a não-estacionariedade na quantificação de curvas IDF futuras, utilizando o tempo como covariante e configurando 5 modelos não-estacionários, em adição a 1 modelo estacionário. O EQM_{NS} permitiu estimar os impactos das mudanças climáticas sobre as curvas IDF em duas áreas altamente urbanizadas no Brasil: São Paulo e Porto Alegre. Primeiro, foram avaliadas as condições históricas das curvas IDF adotando-se abordagem estacionária e não-estacionária. Em seguida, foram conduzidas análises acerca das futuras características dos eventos extremos de precipitação, utilizando para esta finalidade o modelo Eta. O modelo Eta estima dados climáticos em diferentes resoluções para diferentes GCMs de contorno, permitindo-se explorar a disponibilidade do modelo.

Para o período histórico, foram identificadas diferenças entre curvas IDF estacionárias e não-estacionárias em São Paulo. A usual adoção de modelagem estacionária na estimativa de relações IDF produziu intensidades de precipitação inferiores àquelas produzidas com modelagem não-estacionária para esta estação. Diferentemente da estação São Paulo, para a estação Porto Alegre identificou-se que

a modelagem estacionária apresenta melhor desempenho no ajuste aos dados observados quando comparada à não-estacionária, não havendo mudança significativa ao longo dos anos. Isso demonstra que, para o período histórico, os padrões de precipitação intensas podem variar por região, dadas as especificidades geográficas, climáticas e efeitos urbanos.

A análise ao desempenho dos diferentes modelos climáticos Eta na representação dos eventos intensos apresentou bom ajuste, não ocorrendo diferenças substanciais entre os modelos, nem mesmo para os modelos de maior resolução espacial (5 km).

A adoção de diferentes modelos climáticos Eta-GCM induziu a resultados diversos de estimativas das precipitações intensas, para ambos os métodos EQM e EQM_{NS}. Os resultados produzidos indicaram maior variação da intensidade para eventos de menor duração e frequência (eventos curtos e esporádicos); ainda, a variabilidade dos modelos se mostrou em maiores proporções quando da adoção de abordagem não-estacionária, em comparação à estacionária.

IDFs adaptadas ao futuro foram produzidas para a mediana do conjunto dos modelos. Mediante análise de não-estacionariedade, foram comparadas abordagem estacionária (EQM) e não-estacionária (EQM_{NS}). Os resultados indicaram que o melhor modelo pode não ser não-estacionário; além disso, diferentes modelos (estacionário e/ou não-estacionários) podem ser identificados como melhor para diferentes durações de precipitação. Logo, avaliar diferentes combinações de modelos permite um amplo entendimento do comportamento das séries de precipitações futuras e respectivas estimativas de intensidade de precipitação.

Os resultados produzidos para a estação São Paulo, no período futuro, não indicaram não-estacionariedade associada às séries de precipitações futuras estimadas pelo método EQM_{NS}, nem para Eta (3-horas) nem para Eta (Diária). Não foram observadas diferenças significativas entre os resultados para as duas resoluções temporais e, também, não se observou um padrão de mudança entre os RCPs. Sob abordagem estacionária, a mudança relativa ao período histórico apresentou valores negativos para eventos frequentes de maior duração; contudo, essa observação é contrariada sob abordagem não-estacionária, indicando que, de fato, a mudança relativa ao período histórico tende a ser positiva. Esse comportamento difere para a abordagem não-estacionária dada a presença de tendência no período histórico, indicando que o EQM_{NS} é capaz de transferir as

informações associadas ao período presente para o período futuro. Em análise a probabilidade de ocorrência, a abordagem não-estacionária apresentou tendência a reduzir em até 4 vezes o tempo de retorno. Por outro lado, os resultados produzidos para a estação Porto Alegre, no período futuro, indicaram presença de tendência associada para a maioria dos casos simulados. Foram observados padrões distintos de mudança para as diferentes resoluções temporais utilizadas, dada a variabilidade dos modelos não-estacionários associadas às séries futuras de precipitações máximas. Ainda, observou-se aumentos mais significativos para a abordagem não-estacionária que para abordagem estacionária. A abordagem não-estacionária se revelou mais influente em São Paulo que em Porto Alegre. Para a cidade de São Paulo, entretanto, os resultados indicam maior destaque para as alterações que ocorrem no microclima urbano, dadas as ilhas de calor urbanas, em comparação aos efeitos de mudanças climáticas globais.

A adoção de um comportamento estacionário associada às projeções do clima pode mascarar o efeito da mudança do clima, enquanto a adoção de um comportamento não-estacionário, mediante identificação, é capaz de fortalecer o poder da mudança. Essas conclusões são relevantes, pois a carência de investigações mais precisas e adoção de uma abordagem específica pode induzir erros. Ainda, o poder da não-estacionariedade analisada neste trabalho é validada para um nível de confiança de 95%.

As incertezas associadas às estimativas de precipitações intensas são inerentes às múltiplas escolhas a serem tomadas para esta finalidade. Em adição, a variabilidade climática e limitação das previsões/projeções do clima são desafios a uma melhor estimativa. A análise de incertezas associadas aos métodos de distribuição estatística indicou que, para a estação de São Paulo, mesmo as incertezas decorrentes das estimativas no período histórico são inferiores àquelas no período futuro, sugerindo uma urgência de adaptação para este local. Para a estação de Porto Alegre, os resultados se mostraram mais limitantes dado que não houve uma similaridade entre os padrões no período futuro.

Os resultados aqui apresentados podem servir como insumo para estimar as futuras características das precipitações intensas, apontando para a necessidade de adaptação dos sistemas de infraestrutura de manejo de águas pluviais às mudanças do clima, com intuito de evitar subdimensionamentos de rede. Ainda, como medida de adaptação climática, pode servir como ferramenta de planejamento de médio e longo

prazo. Em decorrência, mitigando efeitos adversos de eventos com potencial de causar desastres em uma sociedade vulnerável, principalmente em áreas de alta densidade urbana.

Além das afirmações acima, acredita-se que a metodologia aqui apresentada poderá servir como elemento a ser adotado em novos Planos Diretores de Drenagem Urbana, elementos para Planejamento Territorial, Gestão de Desastres Naturais ou, pelo menos, motivação para consideração e inclusão de questões de mudanças climáticas.

Novos estudos utilizando a metodologia proposta são recomendados a serem realizados. São eles:

- Análise de impactos de mudanças climáticas em relações IDF, abrangendo diferentes padrões climáticos brasileiros e se possível, com características urbanas que permitam distinguir todas as variáveis que influenciem o estudo. Conduzir estudos em áreas que não sejam caracterizadas como urbanas podem ser úteis para a quantificação dos efeitos de mudanças do clima que não sejam influenciados por efeitos locais, como ilhas de calor urbanas. Além disso, estudos podem se aprofundar em diferentes métodos de distribuição de probabilidades e métodos de estimação dos parâmetros.
- Recentemente, novos conjuntos de modelos climáticos foram lançados, em acordo ao 6º relatório do IPCC, o CMIP6. Sugere-se a aplicação da metodologia proposta aos novos modelos climáticos, permitindo a comparação entre os resultados e melhor inferência acerca dos resultados aqui produzidos.
- Em áreas urbanas, pressupõe-se que os efeitos da impermeabilização do solo em decorrência do processo de urbanização dominam a geração do escoamento superficial. Neste sentido, e dado que o aumento das precipitações intensas varia regionalmente, recomenda-se a realização de análises de sensibilidade de diferentes cenários de impermeabilização e aumento da precipitação, encontrando um cenário ótimo de equilíbrio entre os mesmos que não afetem a geração de escoamento superficial.

- Por fim, recomenda-se a adoção de curvas IDF adaptadas para o futuro no dimensionamento de estruturas de controle do escoamento, de modo a identificar às necessidades futuras, bem como os custos associados às medidas adaptativas.

REFERÊNCIAS

- ABBASNIA, M.; TOROS, H. (2018). Analysis of long-term changes in extreme climatic indices: a case study of the Mediterranean climate, Marmara region, Turkey. *Pure and Applied Geophysics*, v. 175 (11), pp. 3861-3876. DOI: 10.1007/s00024-018-1888-8.
- ADLOUNI, S. E.; OUARDA, T. B. M. J.; ZHANG, X.; ROY, R.; BOBÉE, B. (2007). Generalized maximum likelihood estimators for the nonstationarity generalized extreme value model. *Water Resources Research*, v. 43, W03410. DOI: 10.1029/2005WR004545.
- AGILAN, V.; UMAMAHESH, N. V. (2015). Detection and attribution of non-stationarity in intensity and frequency of daily and 4-hr extreme rainfall of Hyderabad, India. *Journal of Hydrology*, 530, pp. 677-697. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.10.028>.
- AGILAN, V.; UMAMAHESH, N. V. (2017). What are the best covariates for developing non-stationary rainfall intensity-duration-frequency relationship? *Advances Water Resources*, 101, pp. 11-22. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2016.02.016>.
- AGUIAR, F. C.; BENTZ, J.; SILVA, J. M. N.; FONSECA, A. L.; SWART, R.; SANTOS, F. D.; PENHA-LOPES, G. (2018). Adaptation to climate change at local level in Europe: An overview. *Environmental Science and Policy*, 86, pp.38-63. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.04.010>.
- ALEXANDER, L. V.; ARBLASTER, J. M. (2017). Historical and projected trends in temperature and precipitation extremes in Australia in observations and CMIP5. *Weather and Climate Extremes*, 15, pp. 34-56. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2017.02.001>.
- ALEXANDRA, W. (2018). Why extreme rains are gaining strength as the climate warms. *Nature*, 563, pp. 458-460. <https://doi.org/10.1038/d41586-018-07447-1>.
- ALLAN, R. P.; BARLOW, M.; BURNE, M. P.; CHERCHI, A.; DOUVILLE, H.; FOWLER, H. J.; GAN, T. Y.; PENDERGRASS, A. G.; ROSENFELD, D.; SWANN, A. L. S.; WILCOX, L. J.; ZOLINA, O. (2020). Advances in understanding large-scale responses of the water cycle to climate change. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1472, 1, pp. 49-75. <https://doi.org/10.1111/nyas.14337>.
- AL MAMOON, A.; JOERGENSEN, N. E.; RAHMAN, A.; QASEM, H. (2016). Design rainfall in Qatar: sensitivity to climate change scenarios. *Natural Hazards*, v. 81, pp. 1797-1810. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2156-9>.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22 (6), pp. 711-728. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0507.
- ANANDHI, A.; FREI, A.; PIERSON, D. C.; SCHNEIDERMAN, E. M.; ZION, M. S.; LOUNSBURY, D.; MATONSE, A. H. (2011). Examination of change factor methodologies for climate change impact assessment. *Water Resources Research*, v. 47, W03501. DOI: 10.1029/2010WR009104.

ARNBJERG-NIELSEN, K. (2012). Quantification of climate change effects on extreme precipitation used for high resolution hydrologic design. *Urban Water Journal*, v. 9, pp. 57-65. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2011.630091>.

ARNBJERG-NIELSEN, K.; FLEISCHER, H. S. (2009). Feasible adaptation strategies for increased risk of flooding in cities due to climate change. *Water Science & Technology*, v. 60.2, pp. 273-281. DOI: 10.2166/wst.2009.298.

ARSISO, B. K.; TSIDU, G. M.; STOFFBERG, G. H. (2018). Signature of present and projected climate change at an urban scale: the case of Addis Ababa. *Physics and Chemistry of the Earth*, v. 105, pp. 101-114. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2018.03.008>.

ASADIEH, B.; KRAKAUER, N. Y. (2015). Global trends in extreme precipitation: climate models versus observations. *Hydrology and Earth Sciences System*, 19, pp. 877-891. DOI: 10.5194/hess-19-877-2015.

ASFAW, A.; SIMANE, B.; HASSEN, A.; BANTIDER, A. (2018). Variability and time series trend analysis of rainfall and temperature in northcentral Ethiopia: A case study in Woleka sub-basin. *Weather and Climate Extremes*, 19, pp. 29-41. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2017.12.002>.

BALLING, R. C.; GOODRICH, G. B. (2011). Spatial analysis of variations in precipitation intensity in the USA. *Theoretical Applied Climatology*, 104, pp. 415-421. DOI: 10.1007/s00704-010-0353-0.

BAO, J.; SHERWOOD, S. C.; ALEXANDER, L. V.; EVANS, J. P. (2017). Future increases in extreme precipitation exceed observed scaling rates. *Nature Climate Change*. DOI: 10.1038/NCLIMATE3201.

BARBI, F.; FERREIRA, L. C. (2014). Risks and political responses to climate change in Brazilian coastal cities. *Journal of Risk Research*, 17:4, pp. 485-503. DOI: 10.1080/13669877.2013.788548.

BARBOSA, A. E.; FERNANDES, J. N.; DAVID, L. M. (2012). Key issues for sustainable urban stormwater management. *Water Research*, 46(20), pp. 6787-6798. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.05.029>.

BEGUERÍA, S.; ANGULO-MARTINEZ, M.; VICENTE-SERRANO, S. M.; LÓPEZ-MORENO, J. I.; EL-KENAWY, A. (2011). Assessing trends in extreme precipitation events intensity and magnitude using non-stationary peaks-over-threshold analysis: a case study in northeast Spain from 1930 to 2006. *International Journal of Climatology*, v. 31, pp. 2102-2114. DOI: 10.1002/joc.2218.

BEMFICA, D. C.; GOLDENFUM, J. A.; SILVEIRA, A. L. L. (2000). Análise da aplicabilidade de padrões de chuva de projeto a Porto Alegre. *RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.5, n.4, pp. 5-16. DOI: 10.21168/rbrh.v5n4.p5-16.

BERGGREN, K. (2008). Indicators for urban drainage system-assessment of climate change impacts. In: *Anais da 11th International Conference on Urban Drainage*, Edinburgh, Scotland: 11 ICUD, Munich, Germany, 31 ago – 5 set, 2008.

BLACK, T. L. (1994). The new NMC mesoscale Eta model: description and forecast examples. *Weather and Forecasting*, 9, 2, pp. 265-278. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1994\)009<0265:TNNMEN>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1994)009<0265:TNNMEN>2.0.CO;2)

BORGES DE AMORIN, P.; CHAFFE, P. B. (2019). Towards a comprehensive characterization of evidence in synthesis assessments: the climate change impacts on the Brazilian water resources. *Climatic Change*. DOI: 10.1007/s10584-019-02430-9.

BRASIL. Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. *Estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico; cria o Comitê Interministerial de Saneamento Básico, altera a Lei n. 6.766, de 19 de dezembro de 1979, a Lei nº 8.036, de 11 de maio de 1990, a Lei nº 8.666, de 21 de junho de 1993, e a Lei nº 8.987, de 13 de fevereiro de 1995, e revoga a Lei nº 6.528, de 11 de maio de 1978*. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 5 jan. 2007. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2007/Lei/L11445.htm>. Acesso em: 10 mar. 2019.

BRASIL. Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009. *Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima – PNMC e dá outras providências*. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 29 dez. 2009. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/l12187.htm>. Acesso em 11 mar. 2019.

BRASIL. (2015). *Brasil 2040*. Resumo Executivo. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/images/arquivo/80182/BRASIL-2040-Resumo-Executivo.pdf>>. Acesso 15 sep. 2019.

BRASIL. (2016a). Portaria nº 150, de 10 de maio de 2016. Institui o Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 11 mai. 2016.

BRASIL. (2016b). *Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima. Volume II: Estratégias Setoriais e Temáticas*. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/images/arquivo/80182/LIVRO_PNA_Plano%20Nacional_V2_copy_copy.pdf>. Acesso 01 set. 2019.

BRASIL. Ministry of Science, Technology and Innovation. Secretariat of Policies and Programs of Research and Development. General Coordination of Global Climate Change. (2016c). Third National Communication of Brazil to the United Nations Framework Convention on Climate Change – Executive Summary. Disponível em: <<http://unfccc.int/resource/docs/natc/branc3es.pdf>>. Acesso em 15 mai. 2021.

BRASIL. (2019). Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento – SNS. *Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico do Manejo de Águas Pluviais – 2017*. Brasília: SNS/MDR. 264p.

BRÊDA, J. P. F. (2021). Impactos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos da América do Sul através das projeções do CMIP5. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, *Universidade Federal do Rio Grande do Sul*, 111f.

BULKELEY. (2010). Cities and the Governing of Climate Change. *Annual Review of Environment and Resources*, 35(1), pp.229-253. DOI: 10.1146/annurev-environ-072809-101747.

BURNHAN, K.P.; ANDERSON, D.R. (2004). Multimodel inference: Understanding AIC and BIC in model selection. *Sociological Methods & Research*, 33, pp. 261-304. <https://doi.org/10.1177/0049124104268644>.

CANHOLI, A. P. (2015). *Drenagem urbana e controle de enchentes* (2nd ed.). São Paulo: Oficina de Textos.

CANNON, A. J.; SOBIE, S. R.; MURDOCK, T. Q. (2015). Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: how well do methods preserve changes in quantiles and extremes? *Journal of Climate*, v. 28, pp. 6938-6959. DOI: 10.1175/JCLI-D-14-00754.1.

CASTELLO, M. G. (2011). Brazilian policies on climate change: The missing link to cities. *Cities*, 28, 498-504. DOI: 10.1016/j.cities.2011.08.002.

CHENG, L.; AGHAKOUCHAK, A. (2014). Nonstationarity precipitation intensity-duration-frequency curves for infrastructure design in a changing climate. *Scientific Reports*, v. 4, 7093, pp. 1-6. DOI: 10.1038/srep07093.

CHENG, L.; AGHAKOUCHAK, A.; GILLELAND, E.; KATZ, R.W. (2014). Nonstationarity extreme value analysis in a changing climate. *Climate Change*, 127, pp. 353–369. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1254-5>.

CHOU, S. C.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DERECZYNSKI, C.; PILOTTO, I.; GOMES, J.; BUSTAMANETE, J.; TAVARES, P.; SILVA, A.; RODRIGUES, D.; CAMPOS, D.; CHAGAS, D.; SUEIRO, G.; SIQUEIRA, G.; NOBRE, P.; MARENGO, J. (2014a). Evaluation of the Eta simulations nested in three global climate models. *American Journal of Climate Change*, v. 3, pp. 438-454. DOI: 10.4236/ajcc.2014.35039.

CHOU, S. C.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DERECZYNSKI, C.; PILOTTO, I.; GOMES, J.; BUSTAMANETE, J.; TAVARES, P.; SILVA, A.; RODRIGUES, D.; CAMPOS, D.; CHAGAS, D.; SUEIRO, G.; SIQUEIRA, G.; NOBRE, P.; MARENGO, J. (2014b). Assessment of climate change over South America under RCP 4.5 and 8.5 downscaling scenarios. *American Journal of Climate Change*, v. 3, pp. 512-527. DOI: 10.4236/ajcc.2014.35043.

CHRISTENSEN, J. H.; BOBERG, F.; CHRISTENSEN, O. B.; LUCAS-PICHER, P. (2008). On the needs for bias-correction of regional climate change projections of temperature and precipitation. *Geophysical Research Letters*, v. 35, L20709. DOI: 10.1029/2008GL035694.

COLES, S. (2001). *An introduction to statistical modeling of extreme values*. Springer, 221f.

COOK, L. M.; MCGINNIS, S.; SAMARAS, C. (2020). The effect of modelling choices on updating intensity-duration-frequency curves and stormwater infrastructure designs for climate change. *Climatic Change*, v. 159, pp. 289-308. <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02649-6>.

CPRM. Serviço Geológico do Brasil. 2015. *Atlas Pluviométrico do Brasil – Equações Intensidade-Duração-Frequência. Município: Porto Alegre. Estação Pluviográfica: Porto Alegre, Códigos 03051011 (ANA) e 83967 (OMM)*. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/18700/1/Relatorio_idf_pa.pdf>. Acesso em 15 mai. 2021.

DAEE – DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA DE SÃO PAULO. (2018). *Precipitações intensas no estado de São Paulo*. São Paulo: Governo do Estado de São Paulo, 270p.

DALAGNOL, R.; GRAMCIANINOV, C. B.; CRESPO, N. M.; LUIZ, R.; CHIQUETTO, J. B.; MARQUES, M. T. A.; DOLIF NETO, G.; ABREU, R. C.; LI, S.; LOTT, F. C.; ANDERSON, L. O.; SPARROW, S. (2021). Extreme rainfall and its impacts in the Brazilian Minas Gerais state in January 2020: Can we blame climate change? *Climate Resiliente and Sustainability*, 2022, e15. <https://doi.org/10.1002/cli2.15>.

DEBORTOLI, N. S.; CAMARINHA, P. I. M.; MARENGO, J. A.; RODRIGUES, R. R. (2017). An index of Brazil's vulnerability to expected increases in natural flash flooding and landslide disasters in the context of climate change. *Natural Hazard*, 86 (2), pp.557-582. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2705-2>.

de JONG, P.; TANAJURA, C. A. S.; SÁNCHEZ, A. S.; DARGAVILLE, R., KIPERSTOK, A.; TORRES, E. A. (2018). Hydroelectric production from Brazil's São Francisco River could cease due to climate change and inter-annual variability. *Science of the Total Environment*, 634, pp.1540-1553. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.256>.

DEFRA. (2011). *National standards for sustainable drainage systems – Designing, constructing, operating and maintaining drainage for surface runoff*. Department for Environment Food and Rural Affairs. London: England, 12p. Disponível em: <https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/82421/suds-consult-annexa-national-standards-111221.pdf>. Acesso em 04 mar. 2019.

DEGAETANO, A.; CASTELLANO, C. M. (2017). Future projections of extreme precipitation intensity-duration-frequency curves for climate adaptation planning in New York State. *Climate Services*, 5, pp.: 23-35. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2017.03.003>.

de MACEDO, M.B.; LAGO, C. A. F.; MENDIONDO, E. M. (2019). Stormwater volume reduction and water quality improvement by bioretention: Potentials and challenges for water security in a subtropical catchment. *Science of the Total Environment*, 647, pp.923-931. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.002>.

de OLIVEIRA, V. A.; de MELLO, C. R.; BESKOW, S.; VIOLA, M. R.; SRINIVASAN, R. (2019). Modeling the effects of climate change on hydrology and sediment load in a headwater basin in the Brazilian Cerrado biome. *Ecological Engineering*, 133, pp. 20-31. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2019.04.021.

DI GIULIO, G. M.; BEDRAN-MARTINS, A. M. B.; VASCONCELLOS, M. P.; RIBEIRO, W. C.; LEMOS, M. C. (2018). Mainstreaming climate adaptation in the megacity of São Paulo, Brazil. *Cities*, 72, 237-244. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cities.2017.09.001>.

DOHERTY, M.; KLIMA, K.; HELLMANN, J. J. (2016). Climate change in the urban environment: advancing, measuring and achieving resiliency. *Environmental Science & Policy*, 66, pp.210-313. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsci.2016.09.001>.

DONAT, M.G.; LOWRY, A. L.; ALEXANDER, L.V.; O'GORMAN, P.A.; MAHER, N. (2016). More extreme precipitation in the world's dry and wet regions. *Nature Climate Change*, 6, pp. 508-513. DOI: 10.1038/NCLIMATE3160.

DOSIO, A.; PARUOLO, P.; ROJAS, R. (2012). Bias correction of the ENSEMBLES high resolution climate change projections for use by impact models: analysis of the climate change signal. *Journal of Geophysical Research*, v. 117, D17110. DOI: 10.1029/2012JD017968.

EASTERLING, D.R.; EVANS, J. L.; GROISMAN, P. Y.; KARL, T. R.; KUNKEL, K. E.; AMBENJE, P. (2000). Observed variability and trends in extreme climate events: a brief review. *American Meteorological Society*, 81, pp. 417-425. DOI: 10.1175/1520-0477(2000)081<0417:OVATIE>2.3.CO;2, 2000.

EEKHOUT, J. P. C.; HUNINK, J. E.; TERINK, W.; VENITE, J. (2018). Why increased extreme precipitation under climate change negatively affects water security. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22, pp. 5935-5946. <https://doi.org/10.5194/hess-22-5935-2018>.

EFRON, B.; TIBSHIRANI, R.J. (1993). *An Introduction to the Bootstrap*. New York: Chapman & Hall/CRC, p. 456.

EGGER, C.; MAURER, M. (2015). Importance of anthropogenic climate impact, sampling error and urban development in sewer system design. *Water Research*, v. 73, pp. 78-97. <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2014.12.050>.

EMORI, S.; BROWN, S. (2005). Dynamic and thermodynamic changes in mean and extreme precipitation under climate change. *Geophysical Research Letters*, 32 (17), pp. L17706. DOI: <https://doi.org/10.1029/2005GL023272>.

FANG, G. H.; YANG, J.; CHEN, Y. N.; ZAMMIT, C. (2015). Comparing bias correction methods in downscaling meteorological variables for a hydrologic impact study in an arid area in China. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 19, pp. 2547-2559. DOI: 10.5194/hess-19-2547-2015.

FISCHER, E. M.; KNUTTI, R. (2015). Anthropogenic contribution to global occurrence of heavy-precipitation and high-temperatures extremes. *Nature Climate Change*, 5, pp. 560-564. <https://doi.org/10.1038/nclimate2617>.

GADELHA, A. N.; COELHO, V. H. R.; XAVIER, A. C.; BARBOSA, L. R.; MELO, D. C. D.; XUA, Y.; HUFFMAN, G. J.; PETERSEN, W. A.; ALMEIDA, C. N. (2019). Grid box-level evaluation of IMERG over Brazil at various space and time scales. *Atmospheric Research*, 218, pp.231-244. <https://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.12.001>.

GANGULI, P.; COULIBALY, P. (2017). A Does nonstationarity in rainfall require nonstationary intensity–duration–frequency curves? *Hydrology and Earth System Sciences*, 21, pp. 6461-6483. <https://doi.org/10.5194/hess-21-6461-2017>.

GANGULI, P.; COULIBALY, P. (2019). Assessment of future changes in intensity-duration-frequency curves for Southern Ontario using North American (NA)-CORDEX models with nonstationary methods. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 22, 100587. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.12.007>.

GAO, L.; HUANG, J.; CHEN, X.; CHEN, Y.; LIU, M. (2018). Contributions of natural climate changes and human activities to the trend of extreme precipitation. *Atmospheric Research*, 205, pp. 60-69. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.02.006>.

GAO, J.; SHESHUKOV, A. Y.; YEN, H.; DOUGLAS-MANKIN, K. R.; WHITE, M. J.; ARNOLD, J. G. (2019). Uncertainty of hydrological processes caused by bias-corrected CMIP5 climate change projections with alternative historical data sources. *Journal of Hydrology*, v. 568, pp. 551-561. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.10.041>.

GERSONIOUS, B. (2012). *The resilience approach to climate adaptation applied for flood risk*. Delft University of Technology, Delft (Dissertation).

GILLELAND, E. (2021). Package 'extRemes', version 2.1-1. *Extreme value analysis*. Disponível em: < <https://www.rdocumentation.org/packages/extRemes/versions/2.1-1> >. Acesso em 02 mar 2022.

GOMES, C. A. B. M.; BAPTISTA, M. B.; NASCIMENTO, N. O. (2008). Financiamento da drenagem urbana: uma reflexão. *RBRH – Revista Brasileira dos Recursos Hídricos*, 13, 3, 93-104. DOI: 10.21168/rbrh.v13n3.p93-104.

GOULROUBARY, V. R.; ZENG, Y.; MANNAERTS, C. M.; SU, Z (BOB). (2017). Detecting the effect of urban land use on precipitation in the Netherlands. *Weather and Climate Extremes*, v. 17, pp. 36-46. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wace.2017.07.003>.

GRAHAN, L. P.; ANDRÉASSON, J.; CARLSSON, B. (2007). Assessing climate change impacts on hydrology from an ensemble of regional climate models, model scales and linking methods – a case study on the Lule River basin. *Climate Change*, v. 81, pp. 293-307. DOI: 10.1007/s10584-006-9215-2.

GU, X.; YE, L.; XIN, Q.; ZHANG, C.; ZENG, F.; NERANTZAKI, S. D.; PAPALEXIOU, S. M. (2022). Extreme precipitation in China: a review. *Advances in Water Resources*, 104144. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2022.104144>.

G1 SOROCABA E JUNDIAÍ. *Chuva causa pontos de alagamento em Sorocaba*. (2019). Disponível em: <<https://g1.globo.com/sp/sorocaba-jundiai/noticia/2019/02/26/chuva-causa-pontos-de-alagamento-em-sorocaba.ghhtml>>. Acesso em 24 jun. 2019.

HASSANZADEH, E.; NAZEMI, A.; ELSHORBAGY, A. (2014). Quantile-based downscaling of precipitation using genetic programming: application to IDF curves in Saskatoon. *Journal of Hydrological Engineering*, v. 19(5), pp. 943-955. DOI: 10.1061/(asce)he.1943-5584.0000854.

HASSANZADEH, E.; NAZEMI, A.; ADAMOWSKI, J.; NGUYEN, T-H; VAN-NGUYEN, V-T. (2019). Quantile-based downscaling of rainfall extremes: notes on methodological

functionality, associated uncertainty and application in practice. *Advances in Water Resources*, 131, 103371. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2019.07.001>.

HELPER, A. L.; DORNELLES, F.; GOLDENFUM, J. A. (2017). Implications of discontinuous IDF equations in generation of runoff hydrographs. Case study: IDF-Porto Alegre (8º DISME). *RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 22, e52. DOI: 10.1590/2318-0331.0217170004 .

HU, C.; XU, Y.; HAN, L.; YANG, L.; XU, G. (2015). Long-term trends in daily precipitation over the Yangtze River Delta region during 1960-2012, Eastern China. *Theoretical and Applied Climatology*, 125, pp. 131-147. DOI: 10.1007/s00704-015-1493-z.

HUANG, H.; CUI, H.; GE, Q. (2021). Will a nonstationary change in extreme precipitation affect dam security in China? *Journal of Hydrology*, v. 603, part A, 126859. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126859>.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. (2010). *Censo demográfico 1960, 1970, 1980, 1991, 2000, 2010*. Disponível em: <<https://censo2010.ibge.gov.br/sinopse/index.php?dados=8&uf=00>>. Acesso em 02 fev. 2022.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. (2014). *Perfil dos municípios brasileiros 2013*. Rio de Janeiro: IBGE, 2014. 284p. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticasnovoportal/multidominio/meio-ambiente/10586-pesquisa-deinformacoes-basicas-municipais.html?edicao=18190&t=publicacoes>>. Acesso em 8 mar. 2019.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. (2018). *Perfil dos municípios brasileiros 2017*. Rio de Janeiro: IBGE, 2018. 106p. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101595.pdf>>. Acesso em 8 mar. 2019.

IPCC. (1990). *Climate change: The IPCC scientific assessment (1990)*. In: Houghton, J. T.; Jenkins, G. J.; Ephraums, J. J. (Eds.), Contribution of Working Group I to the IPCC First Assessment Report, Cambridge University Press, Cambridge, Great Britain, New York, NY, USA and Melbourne, Australia. 410p. Disponível em: <https://archive.ipcc.ch/ipccreports/far/wg_I/ipcc_far_wg_I_full_report.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2018.

IPCC. (2013). Annex III: Glossary [Planton, S. (ed.)]. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC. (2014). *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 [Pachauri, R. K.; and Meyer, L. A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151p.

IPCC. (2021). Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. P'ean, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 3–32, DOI: 10.1017/9781009157896.001.

IPH – INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS. (2005). Manual de drenagem urbana de Porto Alegre. Porto Alegre, RS: Prefeitura Municipal de Porto Alegre, Departamento de Esgotos Pluviais, 167p. 2005. Disponível em: <http://proweb.procempa.com.br/pmpa/prefpoa/dep/usu_doc/manual_de_drenagem_ultima_versao.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2019.

IPH – INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS. (2018). Manual de drenagem urbana do município de Tubarão. Porto Alegre, RS: Prefeitura Municipal de Tubarão, Secretaria de Proteção e Defesa Civil, 140p. 2018.

INMET. (2020). Estação convencional 83587 Belo Horizonte. Brasil: Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Disponível em: <<https://clima.inmet.gov.br>>. Acesso em 04 fev. 2022.

INSURANCE BUREAU OF CANADA. (2020). *Severe Weather Caused \$1.3 Billion in Insured Damage in 2019*. Disponível em: <<http://www.ibc.ca/on/resources/media-centre/media-releases/severe-weather-caused-1-3-billion-in-insured-damage-in-2019>>. Acesso em 04 jun. 2020.

JAKOB, D.; WALLAND, D. (2016). Variability and long-term change in Australian temperature and precipitation extremes. *Weather and Climate Extremes*, 14, pp. 36-55. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wace.2016.11.001>.

JIN, M.; SHEPERD, J. M. (2005). Inclusion of urban landscape in a climate model: how can satellite data help? *Bulletin of American Meteorological Society*, 86 (5), pp. 681-689. DOI: 10.1175/BAMS-86-5-681.

KATZ, R. W.; PARLANGE, M. B.; NAVEAU, P. (2012). Statistics of extremes in hydrology. *Advances in Water Resources*, 25, pp. 1287-1304.

KATZ, R. W. (2013). Statistical methods for nonstationary extremes. In *Extremes in a changing climate: detection, analysis and uncertainty*, edited by A. AghaKouchak, A., D. Easterling, K. H. S. Schubert, and S. Sorooshian, pp. 15-37. Spring: London.

KIM, H.; KIM, S.; SHIN, H.; HEO, J-H. (2017). Appropriate models selection methods for nonstationarity generalized extreme value models. *Journal of Hydrology*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.02.005>.

KIM, K. B.; KNOW, H. H.; HAN, D. (2015). Bias correction methods for regional climate model simulations considering the distributional parametric uncertainty underlying the observations. *Journal of Hydrology*, v. 530, pp. 568-579. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.10.015>.

KNUTTI, R.; SEDLACEK, J. (2013). Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections. *Nature Climate Change*, v. 3, pp. 369-373. DOI: 10.1038/NCLIMATE1716.

KOUTSOYIANNIS, D.; MONTANARI, A. (2015). Neglecting killing of scientific concepts: the stationary case. *Hydrological Sciences Journal*, 60, 7-8, pp. 1174-1183. <https://doi.org/10.1080/02626667.2014.959959>.

LEHMANN, P.; BRENNCK, M.; GEBHARDT, O.; SCHALLER, S.; SÜßBAUER, E. (2015). Barriers and opportunities for urban adaptation planning: analytical framework and evidence from cities in Latin America and Germany. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 20, 1, pp.75-97. <https://doi.org/10.1007/s11027-013-9480-0>.

LI, L.; JIANG, C.; MURTUGUDDE, R.; LIANG, X-Z; SAPKOTA, A. (2021). Global population exposed to extreme events in the 150 most populated cities of the world: implications for public health. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(3), 1293. <https://doi.org/10.3390/ijerph18031293>.

LI, H.; SHEFFIELD, J.; WOOD, E. F. (2010). Bias correction of monthly precipitation and temperature fields from Intergovernmental Panel on Climate Change AR4 models using equidistance quantile matching. *Journal of Geophysical Research*, v. 115, D10101. DOI: 10.1029/2009JD012882.

LIBERATO, J. A. (2016). Gastos em proteção e defesa civil para prevenção de desastres naturais versus resposta e reconstrução no Brasil. *Revista Técnica CNM*, pp. 37-52.

LIMA, J. W. M.; COLLISCHONN, W.; MARENGO, J. A. (2014). *Efeitos das mudanças climáticas na geração de energia elétrica*. São Paulo: AES Tietê, 2014. 360p. ISBN: 978-85-68717-00-4.

LIMA, G. N.; RUEDA, V. O. M. (2018). The urban growth of the metropolitan area of Sao Paulo and its impact on the climate. *Weather and Climate Extremes*, 21, pp.17-26. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2018.05.002>.

LOPEZ-CANTU, T.; SAMARAS, C. (2018). Temporal and spatial stormwater evaluation of stormwater engineering standard reveals risks and priorities across the United States. *Environmental Research Letters*, v. 13, 074006. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aax696>.

LYRA, A.; TAVARES, P.; CHOU, S. C.; SUEIRO, G.; DEREZYNSKI, C. P.; SONDERMANN, M.; SILVA, A.; MARENGO, J.; GIAROLLA, A. (2017). Climate change projections over three metropolitan regions in Southeast Brazil using the non-hydrostatic Eta regional climate model at 5-km resolution. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 132, 1-2, pp. 663-682. <http://dx.doi.org/10.1007/s00704-017-2067-z>.

MADSEN, H.; LAWRENCE, D.; LANG, M.; MARTINKOVA, M.; KJELDSEN, T. R. (2014). Review of trend analysis and climate change projections of extreme precipitation and floods in Europe. *Journal of Hydrology*, 519, pp. 3634-3650. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.11.003>.

MAGRIN, G.O., MARENGO, J. A.; BOULANGER, J.-P.; CASTELLANOS, E.; POVEDA, G.; SCARANO, F. R.; VICUÑA, S. (2014). Central and South America. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Barros, V.R., C.B. Field, D.J. Dokken, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L.White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1499-1566.

MAILHOT, A, DUCHESNE, S. (2010). Design criteria of urban drainage infrastructures under climate change. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 136(2), pp. 201-208. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452-0000023.

MARAUN, D. (2016). Bias correcting climate change scenarios – a critical review. *Current Climate Change Reports*, v. 2(4), pp. 211-220. DOI: 10.1007/s40641-016-0050-x.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; TORRES, R. R.; CHOU, S. C.; LYRA, A. (2014). Bases para modelagem de mudanças climáticas. In: LIMA, J. W. M; COLLISCHONN, W.; MARENGO, J. A. (Org.). *Efeitos das mudanças climáticas na geração de energia elétrica*. São Paulo: AES Tietê, 2014, 360p.

MARENGO, J. A.; AMBRIZZI, T.; ALVEZ, L. M.; BARRETO, N. J. C.; REBOITA, M. S.; RAMOS, A. M. (2020). Changing trends in rainfall extremes in the metropolitan area of São Paulo: causes and impacts. *Frontiers in Climate*, v. 2. DOI: 10.3389/fclim.2020.00003.

MARENGO, J. A.; VALVERDE, M. C.; OBREGON, G. M. (2013). Observed and projected changes in rainfall extremes in the metropolitan area of São Paulo. *Climatic Research*, 57, pp.61-72. DOI: 10.3354/cr01160.

MARKOLF, S. A.; CHESTER, M. V.; HELMRICH, A. M.; SHANNON, K. (2021). Re-imagining design storm for the challenges of the 21st century. *Cities*, 109, 102981. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2020.102981>.

MARLOW, D. R.; MOGLIA, M.; COOK, S.; BEALE, D. J. (2013). Towards sustainable urban water management: a critical reassessment. *Water Research*, 47, pp. 7150-7161. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.07.046>.

MARSH MCLENNAN. 2021. *Sunk costs: the socioeconomic impacts of flooding, rethinking flood series, Report 1*. Disponível em: <<https://www.mmc.com/insights/publications/2021/june/the-socioeconomic-impacts-of-flooding.html>>. Acesso em 17 ago. 2021.

MARTIN, G. M.; BELLOUIN, N.; COLLINS, W. J.; CULVERWELL, I. D.; HALLORAN, P. R.; HARDIMAN, S. C.; HINTON, T. J.; JONES, C. D.; MCDONALD, R. E.; MCLAREN, A. J.; OCONNOR, F. M.; ROBERTS, M. J.; RODRIGUEZ, J. M.; WOODWARD, S.; BEST, M. J.; BROOKS, M. E.; BROWN, A. R.; BUTCHART, N.; DEARDEN, C.; DERBYSHIRE, S. H.; DHARSSI, I.; DOUTRIAUX-BOUCHER, M.; EDWARDS, J. M.; FALLOON, P. D.; GEDNEY, N.; GRAY, L. J.; HEWITT, H. T.;

HOBSON, M.; HUDDLESTON, M. R.; HUGHES, J.; INESON, S.; INGRAM, W. J.; JAMES, P. M.; JOHNS, T. C.; JOHNSON, C. E.; JONES, A.; JONES, C. P.; JOSHI, M. M.; KEEN, A. B.; LIDDICOAT, S.; LOCK, A. P.; MAIDENS, A.V.; MANNERS, J. C.; MILTON, S. F.; RAE, J. G. L.; RIDLEY, J. K.; SELLAR, A.; SENIOR, C. A.; TOTTERDELL, I. J.; VERHOEF, A.; VIDALE, P. L.; WILTSHIRE, A. (2011). The HADGEM family of Met Office unified model climate configurations. *Geoscientific Model Development*, v. 4, pp. 723-757. DOI: 10.5194/gmd-4-723-2011.

MARTINS, J. R. S. (2015). Obras de macrodrenagem. In: TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L.; BARROS, M. T. (Org.) *Drenagem urbana*. ABRH: Porto Alegre, reimpressão da 1ª ed., 2015.

MARTINS, E. S.; STEDINGER, J. R. (2000). Generalized maximum-likelihood generalized extreme-value quantile estimators for hydrologic data. *Water Resources Research*, v. 36(3), pp. 737-744.

MCGRANE, S. J. (2016). Impacts of urbanisation on hydrological and water quality dynamics, and urban water management: a review. *Hydrological Sciences Journal*, 61:13, pp. 2295-2311. DOI: 10.1080/02626667.2015.1128084.

MEEHL, G. A.; KARL, T.; EASTERLING, D. R.; CHANGNON, S.; PIELKE JR, R.; CHANGNON, D.; EVANS, J.; GROISMAN, P. Y.; KNUSTON, T. R.; KUNKEL, K. E.; MEARNS, L. O.; PARMESAN, C.; PULWARTY, R.; ROOT, T.; SYLVES, R. T.; WHETTON, P.; ZWIERS, F. (2000). An introduction to trends in extreme weather and climate events: observations, socioeconomic impacts, terrestrial ecological impacts, and model projections. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 81, n. 3, pp. 414-416. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(2000\)081<0413:AITTIE>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(2000)081<0413:AITTIE>2.3.CO;2).

METSUL. (2021). *130 bilhões de litros de água caíram em cinco horas em Nova York*. Disponível em: <<https://metsul.com/130-bilhoes-de-litros-de-agua-cairam-em-cinco-horas-em-nova-york/>>. Acesso em 04 fev. 2022.

MIGUEL AYALA, L.; VAN EUPEN, M.; ZHANG, G., PÉREZ-SOBA, M., MARTORANO, L. G.; LISBOA, L. S.; BELTRAO, N. E. (2016). Impact of agricultural expansion on water footprint in the Amazon under climate change scenarios. *Science of the Total Environment*, 569-570, pp.1159-1173. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.06.191.

MIGUEZ, M. G.; VERÓL, A. P.; REZENDE, O. M. (2016). *Drenagem urbana – do projeto tradicional à sustentabilidade*. Elsevier Editora: Rio de Janeiro, 366p. 2016.

MILLY, P. C. D.; BETANCOURT, J.; FALKENMARK, M.; HIRSCH, R. M.; KUNDZEWICZ, Z. W.; LETTENMAIER, D. P.; STOUFFER, R. J. (2008). Stationary is dead: Whither water management? *Science*, 319, pp. 573-574.

MIN, Y.-M.; KRYJOV, V. N.; OH, S. M. (2014). Assessment of APCC multimodel ensemble prediction in seasonal climate forecasting: Retrospective (1983–2003) and real-time forecasts (2008–2013). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119, pp.12132–12150. DOI: 10.1002/2014JD022230.

MIRHOSSEINI, G.; SRIVASTAVA, P.; FANG, X. (2014). Developing rainfall intensity-duration-frequency curves for Alabama under future climate scenarios using artificial

neural networks. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 19, 04014022. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000962.

MONDAL, A.; DANIEL, D. (2019). Return levels under nonstationarity: the need to update infrastructure design strategies. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 24(1), 04018060. DOI: 10.1061/(ASCE)/HE.1943-5584.0001738.

MOSER, S. C.; EKSTROM, J. A. (2010). A framework to diagnose barriers to climate change adaptation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107(51), pp.22026-22031. <https://doi.org/10.1073/pnas.1007887107>.

NAGHETTINI, N.; PINTO, E. J. A. (2007). *Hidrologia Estatística*. CPRM Serviço Geológico do Brasil: Belo Horizonte, 2007, 552p.

NG, E.; REN, C. (2017). China's adaptation to climate & urban climate strategies: a critical review. *Urban Climate*, 23, pp. 352-372. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.07.006>.

NICKEL, D. (2018). Water in the city of the future. *Urban Water Journal*, 15(6), 507, <https://doi.org/10.1080/1573062X.2018.1528729>.

NOBRE, P.; SIQUEIRA, L. P.; ALMEIDA, R. A. F.; MALAGUTTI, M.; GIAROLLA, E.; CASTELÃO, G. P.; BOTTINO, M. J.; KUBOTA, P.; FIGUEROA, S. N.; COSTA, M. C.; BAPTISTA JR., M.; IRBER JR., L.; MARCONDES, G. G. (2013). Climate simulation and change in the Brazilian climate model. *Journal of Climate*, v. 26, pp. 6716-6732. DOI: 10.1175/JCLI-D-12-00580.1.

OBEYESEKERA, J.; SALAS, J. D. (2014). Quantifying the uncertainty of design floods under nonstationary conditions. *Journal of Hydrologic Engineering*, 19(7): 1438-1446. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000931.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS, DEPARTMENT OF ECONOMIC AND SOCIAL AFFAIRS, POPULATION DIVISION. (2022). *World urbanization prospects 2018*. Disponível em: < <https://population.un.org/wup/Country-Profiles/>>. Acesso em 03 fev. 2022.

OUARDA, T. B. M. J.; YOUSEF, L. A.; CHARRON, C. (2018). Non-stationarity intensity-duration-frequency curves integrating information concerning teleconnections and climate change. *International Journal of Climatology*, pp. 1-18. DOI: 10.1002/joc.5953.

OUARDA, T. B. M. J.; CHARRON, C.; ST-HILAIRE, A. (2020). Uncertainty of stationary and nonstationary models for rainfall frequency analysis. *International Journal of Climatology*, 40, pp.2373-2392. DOI: 10.1002/joc.6339.

PENEREIRO, J. C.; MESCHIATTI, M. C. (2018). Tendências em series anuais de precipitação e temperaturas no Brasil. *Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 23, n. 2, pp. 319-331. DOI: 10.1590/S1413-41522018168763.

PREIN, A. F.; LANGHANS, W.; FOSSER, G.; FERRONE, A.; BAN, N.; GOERGEN, K.; KELLER, M.; TOLLE, M.; GUTJAHR, O.; FESER, F.; BRISSON, E.; KOLLET, S.;

SCHIMIDLI, J.; VAN LIPZIG, N. P. M.; LEUNG, R. (2015). A review on regional convection-permitting climate modeling: Demonstrations, prospects, and challenges. *Reviews of Geophysics*, 53, 2, pp. 323-361. <https://doi.org/10.1002/2014RG000475>.

PREIN, A. F.; RASMUSSEN, R. M.; IKEDA, K.; LIU, C.; CLARK, M. P.; HOLLAND, G. J. (2017). The future intensification of hourly precipitation extremes. *Nature Climate Change*. DOI: 10.1038/NCLIMATE3168.

RAGNO, E.; AGHAKOUCHAK, A.; LOVE, C.A.; CHENG, L.; VAHEDIFARD, F.; LIMA, C.H.R., 2018. Quantifying changes in future intensity-duration-frequency curves using multimodel ensemble simulations. *Water Resources Research*, v. 54, pp. 1751-1764. <https://doi.org/10.1002/2017WR021975>.

RAJCZAK, J.; SCHÄR, C. (2017). Projections of future precipitation extremes over Europe: A multimodel assessment of climate simulations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122, pp.10773-10800. <https://doi.org/10.1002/2017JD02716>.

REVI, A.; SATTERTHWAITE, D. E.; ARÁGON-DURAND, F.; CORFEE-MORLOT, J.; KIUNSI, R. B. R.; PELLING, M.; ROBERTS, D. C.; MACH, K. J.; MASTRANDEA, M. D.; BILIR, T. E.; CHATTERJEE, M.; EBI, K. L.; ESTRADA, Y. O.; GENOVA, R. C.; GIRMA, B.; KISSEL, E. S.; LEVY, A. N.; MACCRACKEN, S.; MASTRANDEA, P. R.; WHITE, L. L. (2014). *Climate Change 2014: impacts, adaptation and vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribuição do Grupo de Trabalho II no Quinto Relatório de Avaliação do Intergovernamental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

RIO DE JANEIRO. (2016). *Estratégia de Adaptação às Mudanças Climáticas da Cidade do Rio de Janeiro*. Prefeitura Municipal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro: Rio de Janeiro. 90p. Disponível em: <http://www.centroclima.coppe.ufrj.br/images/Noticias/documentos/Estrategia_adaptacao_PT_260417.pdf>. Acesso em 13 ago. 2019.

ROOTZÉN, H.; KATZ, R. W. (2013). Design life level: quantifying risk in a changing climate. *Water Resources Research*, v. 49, pp. 5964-5972. DOI: 10.1002/wrcr.20425.

SABÓIA, M. A. M.; SOUZA FILHO, F. A.; ARAÚJO JÚNIOR, L. M.; SILVEIRA, C. S. (2017). Climate change impact estimation on urban drainage system located in low latitudes districts: a study case in Fortaleza-CE. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 22. <http://dx.doi.org/10.1590/2318-08331.011716074>.

SALAS, J. D.; OBEYESEKERA, J. (2014). Revisiting the concepts of return period and risk for nonstationary hydrologic extreme events. *Journal of Hydrologic Engineering*, 19(3), pp. 554-568. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000820.

SÃO PAULO. (2009). Lei N. 14.933, de 5 de junho de 2009. *Institui a Política de Mudança do Clima no Município de São Paulo*. Disponível em: <<https://leismunicipais.com.br/a/sp/s/sao-paulo/lei-ordinaria/2009/1493/14933/lei-ordinaria-n-14933-2009-institui-a-politica-de-mudanca-do-clima-no-municipio-de-sao-paulo>>. Acesso 13 ago. 2019.

SÃO PAULO. Secretaria Municipal de Desenvolvimento Urbano. (2012). *Manual de drenagem e manejo de águas pluviais: aspectos tecnológicos – fundamentos*. São Paulo: SMDU, volume II. Disponível em: <https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/desenvolvimento_urbano/arquivos/manual-drenagem_v2.pdf>. Acesso em 02 fev. 2022.

SCHARDONG, A.; SRIVASTAV, R. K.; SIMONOVIC, S. P. (2014). Atualização das curvas intensidade-duração-frequência para a cidade de São Paulo sob efeito de mudanças climáticas. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 19, n. 4, pp. 176-185.

SCHARDONG, A.; GAUR, A.; SIMONOVIC, S. P.; SANDISK, D. (2018). *Computadorized tool for the development of intensity-duration-frequency curves under a changing climate – Technical Manual v.3*. Water Resources Research Report no. 103, Facility for Intelligent Decision Support, Department of Civil and Environmental Engineering, London, Canada, 63p. ISSN: 1913-3219. ISBN: 978-0-7114-3107-4.

SEMADENI-DAVIES, A.; HERNEBRING, C.; SVENSSON, G.; GUSTAFSSON, L-G. (2008). The impacts of climate change and urbanisation on drainage in Helsingborg, Sweden: combined sewer system. *Journal of Hydrology*, v. 350, pp. 100-113. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2007.05.028.

SEN, O.; KAHYA, E. (2021). Impacts of climate change on intensity-duration-frequency curves in the rainiest city (Rize) of Turkey. *Theoretical and Applied Climatology*, 144, pp. 1017-1030. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03592-2>.

SENEVIRATNE, S. I.; NICHOLLS, N.; EASTERLING, D.; GOODESS, C. M.; KANAE, S.; KOSSIN, J.; LUO, Y.; MARENGO, J.; MCINNES, K.; RAHIMI, M.; REICHSTEIN, M.; SORTERBERG, A.; VERA, C.; ZHANG, X. (2012). Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. In: *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation* [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, pp. 109-230.

SERINALDI, F.; KILSBY, C. G. (2015). Stationary is undead: uncertainty dominates the distribution of extremes. *Advances in Water Resources*, v. 77, pp. 17-36. <http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2014.12.013>.

SILVA, C. V. F.; SCHARDONG, A.; GARCIA, J. I. B.; OLIVEIRA, C. P. M. (2018). Climate change impacts and flood control measures for highly developed urban watersheds. *Water*, v. 10(7), 829. DOI: 10.3390/w10070829.

SILVA, D.F.; SIMONOVIC, S.P. (2020). Development of Non-stationary Rainfall Intensity Duration Frequency Curves for Future Climate Conditions. Water Resources Research Report no. 106. *Facility for Intelligent Decision Support, Department of Civil and Environmental Engineering*, London, Ontario, Canada, 49 pages. ISBN: (print) 978-0-7714-3137-1; (online) 978-0-7714-3138-8. Disponível em: <<https://www.eng.uwo.ca/research/iclr/fids/publications/products/106.pdf>>. Acesso em 03 fev 2022.

SILVA, D. F.; MONTE, B. E. O.; GOLDENFUM, J. A.; DORNELLES, F. (2021a). Impactos das mudanças climáticas no município de São Leopoldo/RS: Parte 1 – RELAÇÕES IDF. Anais do XXIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, v. 24. Belo Horizonte: MG. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/233968/001135803.pdf?sequence=1&isAllowed=y>> . Acesso em 13 mar 2022.

SILVA, D. F.; SIMONOVIC, S. P.; SCHARDONG, A.; GOLDENFUM, J. A. (2021b). Introducing non-stationarity in the intensity-duration-frequency curves under a changing climate. *Water*, 13(8), 1008. <https://doi.org/10.3390/w13081008>.

SILVA, D. F.; SIMONOVIC, S. P.; SCHARDONG, A.; GOLDENFUM, J. A. (2021c). Assessment of non-stationary IDF curves under a changing climate: Case study of different zones in Canada. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 36, 100870. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.100870>.

SILVA DIAS, M. A. F.; DIAS, J.; CARVALHO, L. M. V.; FREITAS, E. D.; DIAS, P. L. S. (2013). Changes in extreme daily rainfall for São Paulo, Brazil. *Climate Change*, v. 116, pp. 705-722. DOI: 10.1007/s10584-012-0504-7.

SILVEIRA, A. L. L. (1997). Provável efeito urbano nas relações IDF das chuvas de Porto Alegre. *RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 2(2), pp. 93-107.

SILVEIRA, G. L.; FORGIARINI, F. R.; GOLDENFUM, J. A. (2009). Taxa não é cobrança: uma proposta efetiva aplicação do instrumento de gestão dos recursos hídricos para a drenagem urbana. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 14(4), pp.71-80. DOI: 10.21168/rbrh.v14n14.p71-80.

SIMONOVIC, S. P.; ASCE, F.; SHARDONG, A.; SANDISK, D. (2017). Mapping extreme rainfall statistics for Canada under climate change using updated intensity-duration-frequency curves. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 143 (3). DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452 .0000725.

SIMÕES, E.; SOUSA JÚNIOR, W. C.; FREITAS, D. M.; MILLS, M.; IWAMA, A. Y.; GONÇALVES, I.; OLIVATO, D.; FIDELMAN, P. (2017). Barriers and opportunities for adapting to climate change on the North Coast of São Paulo, Brazil. *Regional Environmental Change*, 17(6), pp. 1739-1750. DOI: 10.1007/s10113-017-1133-5.

SONG, X.; ZHANG, J.; A. A.; ROY, S. S.; C. Y.; WANG, G.; HE, R.; WANG, X.; LU, C. (2014). Rapid urbanization and changes in spatiotemporal characteristics of precipitation in Beijing metropolitan area. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 119, n. 11, pp. 250-271. DOI: 10.1002/2014JD022084.

SRIVASTAV, R. K.; SCHARDONG, A.; SIMONOVIC, S. P. (2014). Equidistance quantile matching method for updating IDF curves under climate change. *Water Resources Management*, v. 28, pp. 2539-2562. DOI: 10.1007/s11269-014-0626-y.

SUGAHARA, S.; ROCHA, R. P.; SILVEIRA, R. (2009). Nonstationary frequency analysis of extreme daily rainfall in Sao Paulo, Brazil. *International Journal of Climatology*, 29, pp. 1339-1349. doi: 10.1002/joc.1760.

SUNYER, M. A.; MADSEN, H.; ANG, P. H. (2012). A comparison of different regional climate models and statistical downscaling methods for extreme rainfall estimation under climate change. *Atmospheric Research*, v. 103, pp. 119-128. DOI: 10.1016/j.atmosres.2011.06.011.

TAN, X.; GAN, T. Y.; SHAO, D. (2017). Effects of persistence and large-scale climate anomalies on trends and change points in extreme precipitation of Canada. *Journal of Hydrology*, 550, pp. 453-465. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.05.028>.

TASCA, F. A.; ASSUNÇÃO, L. B.; FINOTTI, A. R. (2017). International experiences in stormwater fee. *Water Science & Technology*, pp.287-299. DOI: 10.2166/wst.2018.112.

TAYLOR, K. E. (2001). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research*, v. 106, pp. 7183-7192. <https://doi.org/10.1029/2000JD900719>.

TAYLOR, K. E.; STOUFFER, R. J.; MEEHL, G. A. (2012). An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of American Meteorological Society*, v. 93, pp. 485-495. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>.

TEUTSCHBEIN, C.; SEIBERT, J. (2012). Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: review and evaluation of different methods. *Journal of Hydrology*, v. 456-457, pp. 12-29. <https://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.05.052>.

TERRA. (2017). Surpreendente chuva de maio de 2017 no Brasil. Disponível em: <<https://www.terra.com.br/noticias/climatempo/surpreendente-chuva-de-maio-de-2017-no-brasil,5218a4d72d43a961efe50eb8d07c2ff2lq172icx.html>>. Acesso em: 30 abr. 2022.

THEMEßL, M. J.; GOBIET, A.; HEINRICH, G. (2012). Empirical statistical downscaling and error correction of regional climate models and its impact on the climate change signal. *Climatic Change*, v. 112, pp. 449–468, doi:10.1007/s10584-011-0224-4.

THIOMBIANO, A. N.; EL ADLOUNI, S.; ST-HILAIRE, A.; OUARDA, T. B. M. J.; EL-JABI, N. (2017). Nonstationary frequency analysis of extreme daily precipitation amounts in Southeastern Canada using a peaks-over-threshold approach. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 129, pp. 413-426. DOI: 10.1007/s00704-016-1789-7.

TUCCI, C. E. M. (2008). Águas Urbanas. *Estudos Avançados*, 22(63), pp.97-112. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-40142008000200007>.

UFSC. Universidade Federal de Santa Catarina. (2016). *Relatório de danos materiais e prejuízos decorrentes de desastres naturais no Brasil: 1995-2014*. Florianópolis, CEPED UFSC. Disponível em: <http://www.ceped.ufsc.br/wp-content/uploads/2016/04/Relat%C3%B3rio-Danos-e-Preju%C3%ADzos-SC_290316-BAIXA.pdf>. Acesso 02 fev. 2022.

VAN VUUREN, D. P.; EDMONDS, J.; KAINUMA, M.; RIAHI, K.; THOMSOM, A.; HIBBARD, K.; HURTT, G. C.; KRAM, T.; KREY, V.; LAMARQUE, J-F.; MASUI, T.; MEINSHAUSEN, M.; NAKICENOVIC, N.; SMITH, S. J.; ROSE, S. K. (2011). The

representative concentrations pathways: an overview. *Climate Change*, v. 109, pp. 5-31. DOI: 10.1007/s10584-011-0148-z.

WANG, L.; CHEN, W. (2013). A CMIP5 multimodel projection of future temperature, precipitation, and climatological drought in China. *International Journal of Climatology*. DOI: 10.1002/joc.3822.

WATANABE, M.; SUZUKI, T.; O'ISHI, R.; KOMURO, Y.; WATANABE, S.; EMORI, S.; TAKEMURA, T.; CHIKIRA, M.; OGURA, T.; SEKIGUCHI, M. (2010). Improved climate simulation by MIROC5: mean states, variability, and climate sensitivity. *Journal of Climate*, v. 23, pp. 6312-6335. <http://dx.doi.org/10.1175/2010JCLI3679.1>

WILLEMS, P. (2013). Climate change impacts on rainfall extremes and urban drainage & needs for climate adaptation. *Proceedings of 9th EWA Brussels Conference*, Brussels, Belgium. Disponível em: < http://www.ewa-online.eu/id-9th-ewa-brussels-conference.html?file=tl_files/_media/content/documents_pdf/Publications/Proceedings/Brussels-Conference/2013_9th%20Brussels%20Conference/EWA_9th_Brussels_Conference_D1_6-Willems.pdf>. Acesso em: 27 fev. 2019.

WILLEMS, P.; VRAC, M. (2011). Statistical precipitation downscaling for small-scale hydrological impact investigations of climate change. *Journal of Hydrology*, v. 402, pp. 193-205. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2011.02.030.

YANG, P.; REN, G.; YAN, P. (2017). Evidence for a strong association of short-duration intense rainfall with urbanization in the Beijing urban area. *Journal of Climate*, v. 32, n. 3, pp. 5851-5870. DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0671.1.

YOUSEF, L. A.; OUARDA, T. M. J. (2015). Adaptation of water resources management to changing climate: the role of intensity-duration-frequency curves. *International Journal of Environmental Science and Development*, v. 6, n. 6. DOI: 1.7763/IJESD.2015.V6.641.

YILMAZ, A. G.; PERERA, B. J. C. (2014). Extreme rainfall nonstationarity investigation and intensity-frequency-duration relationship. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 19, pp. 1160-1172. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000878.

ZANANDREA, F.; SILVEIRA, A. L. L. (2018). Effects of LID implementation on hydrological processes in an urban catchment under consolidation in Brazil. *Journal of Environmental Engineering*, 114(9), 0401872. DOI: 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870-0001417.

ZHU, Z.; CHEN, X. (2017). Evaluating the effects of low impact development practices on urban flooding under different rainfall intensities. *Water*, v. 9(7), 548. DOI: 10.3390/w9070548.

ZHU, Z.; CHEN, Z.; CHEN, X.; YU, G. (2019). An assessment of the hydrological effectiveness of low impact development (LID) practices for managing runoff with different objectives. *Journal of Environmental Management*, v. 231, pp. 504-514. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.046>.

ZHU, H.; JIANG, Z.; LI, J.; LI, W.; SUN, C.; LI, L. (2020). Does CMIP6 inspire more confidence in simulating climate extremes over China? *Advances in Atmospheric Sciences*, 37(10), pp. 1119-1132. DOI: 10.1007/s003676-020-9289-1.

ZILI, M. T.; CARVALHO, L. M. V.; LIEBMANN, B.; SILVA DIAS, M. A. (2016). A comprehensive analysis of trends in extreme precipitation over southeastern coast of Brazil. *International Journal of Climatology*, 37, pp.2269-2279. DOI: 10.1002/joc.4840.

**APÊNDICE I – ANÁLISE DE TENDÊNCIA ÀS SÉRIES DE PRECIPITAÇÕES
MÁXIMAS ANUAIS NO PERÍODO PRESENTE (HISTÓRICO)**

A) CRITÉRIO DE INFORMAÇÃO AKAIKE

A.1 Valores de CIA

Tabela A-1. Valores de CIA para os diferentes modelos de GEV em séries históricas da estação Porto Alegre.

Duração	CIA					
	I	II	III	IV	V	VI
5 min	185,04	187,00	188,52	188,46	186,79	186,77
10 min	228,96	230,94	231,93	231,90	230,16	230,13
15 min	250,27	252,27	253,80	253,79	251,84	251,83
30 min	279,07	280,75	281,21	281,34	279,25	279,39
45 min	290,76	292,75	294,54	294,56	292,57	292,59
1 h	299,93	301,88	303,15	303,23	301,18	301,24
2 h	303,32	305,26	306,02	306,09	304,06	304,12
3 h	301,58	303,22	303,88	304,00	302,10	302,22
4 h	306,82	308,68	310,24	310,26	308,34	308,36
8 h	316,71	317,35	319,03	318,99	318,27	318,22
14 h	341,12	340,26	341,81	341,78	342,50	342,42
24 h	359,47	359,20	360,19	360,12	361,03	360,95

Tabela A-2. Valores de CIA para os diferentes modelos de GEV em séries históricas da estação São Paulo.

Duração	CIA					
	I	II	III	IV	V	VI
1 h	680,59	667,27	665,94	665,92	682,56	682,55
2 h	715,78	701,20	698,36	698,08	717,62	717,57
3 h	731,15	716,33	710,70	710,62	733,13	733,12
4 h	733,85	722,13	711,84	712,40	735,33	735,04
8 h	742,53	735,58	724,42	727,51	741,42	741,33
14 h	758,62	752,29	744,26	745,60	758,92	758,79
24 h	784,25	776,96	770,20	771,77	785,16	785,15

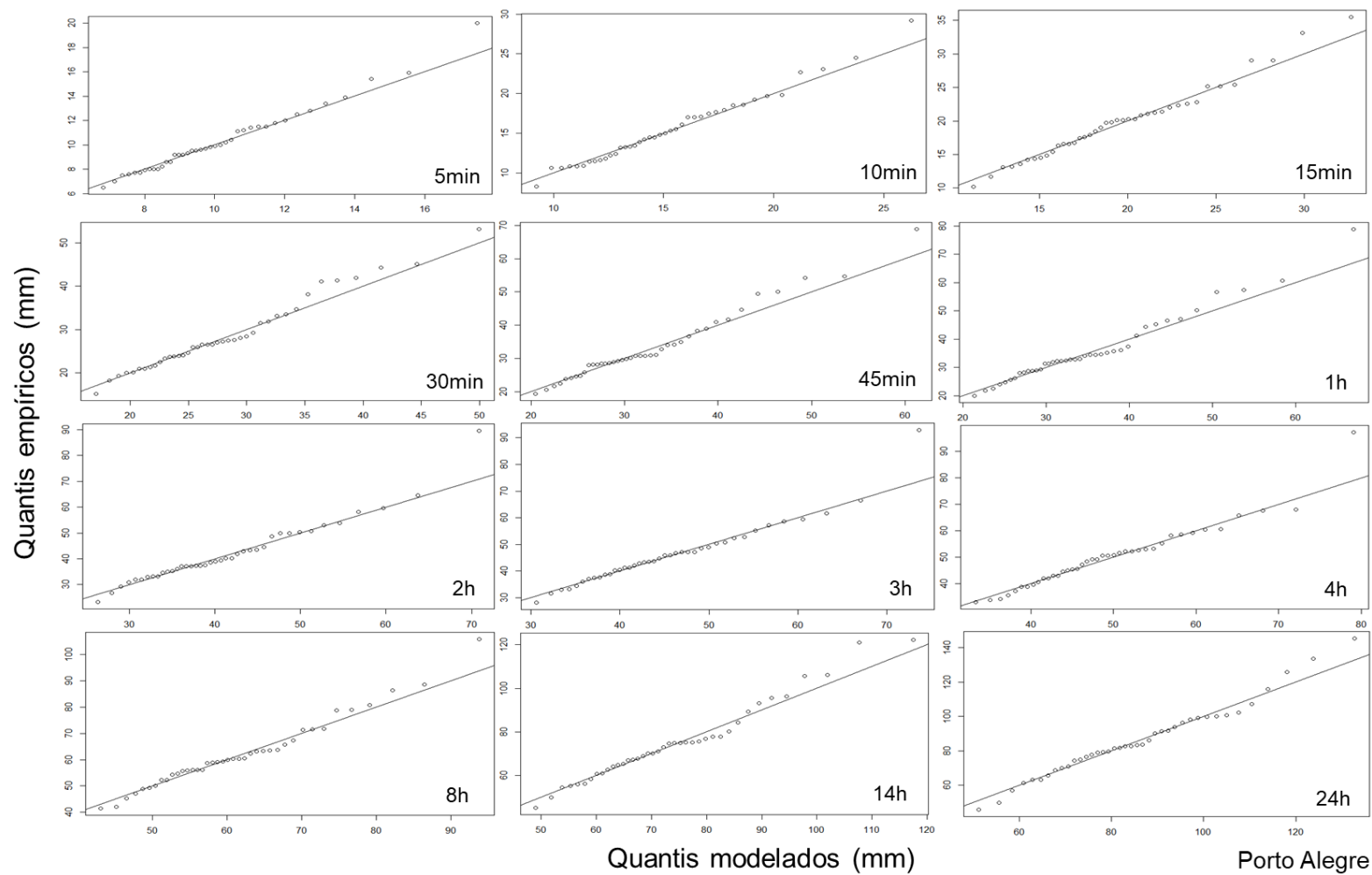
A.3 Valores de CIAC

Tabela A-3. Valores de CIAC para os diferentes modelos de GEV em séries históricas da estação Porto Alegre.

Duração	CIA					
	I	II	III	IV	V	VI
5 min	185,70	188,15	190,28	190,23	187,93	187,91
10 min	229,63	232,08	233,70	233,66	231,30	231,28
15 min	250,94	253,41	255,57	255,55	252,98	252,97
30 min	279,74	281,89	282,98	283,10	280,39	280,53
45 min	291,42	293,90	296,30	296,32	293,72	293,73
1 h	300,59	303,02	304,91	305,00	302,32	302,39
2 h	303,99	306,41	307,79	307,86	305,20	305,26
3 h	302,24	304,37	305,65	305,77	303,24	303,36
4 h	307,49	309,82	312,01	312,02	309,48	309,50
8 h	317,38	318,49	320,79	320,76	319,42	319,36
14 h	341,79	341,40	343,57	343,54	343,64	343,56
24 h	360,14	360,34	361,96	361,89	362,17	362,09

Tabela A-4. Valores de CIAC para os diferentes modelos de GEV em séries históricas da estação São Paulo.

Duração	CIA					
	I	II	III	IV	V	VI
1 h	680,89	667,77	666,70	666,67	683,06	683,05
2 h	716,08	701,70	699,12	698,84	718,12	718,07
3 h	731,45	716,83	711,46	711,38	733,63	733,62
4 h	734,15	722,63	712,60	713,16	735,83	735,54
8 h	742,83	736,08	725,18	728,27	741,92	741,83
14 h	758,91	752,78	745,02	746,36	759,45	759,29
24 h	784,54	777,47	770,96	772,53	785,66	785,65

B) GRÁFICOS QUANTIL-QUANTIL PARA O MELHOR MODELO DE GEV**Figura A-1. Gráficos quantil-quantil para as séries máximas históricas para estação Porto Alegre, utilizando GEV-I.**

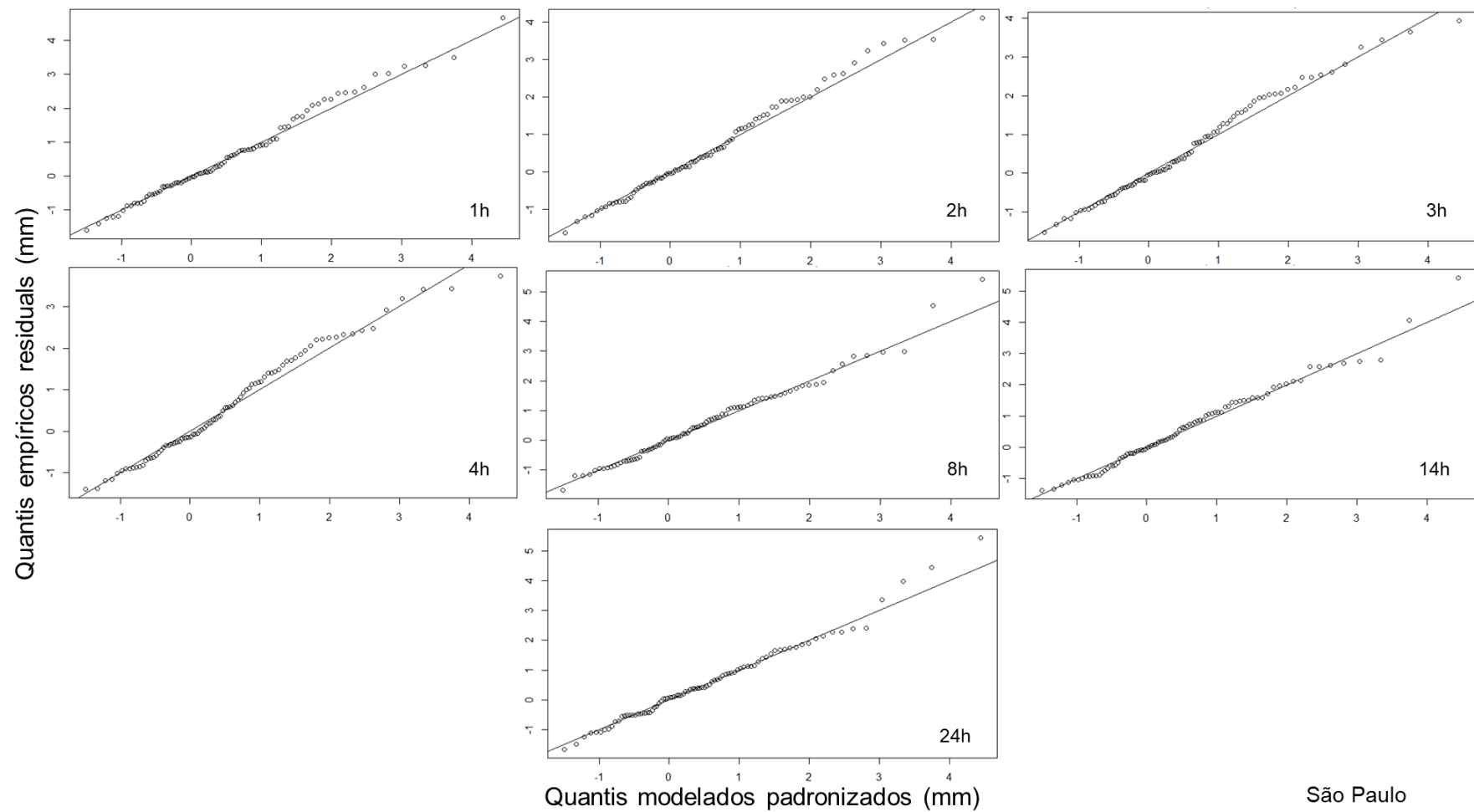


Figura A-2. Gráficos quantil-quantil para as séries máximas históricas para estação São Paulo, utilizando GEV-III.

C) PARÂMETROS DE AJUSTE PARA O MELHOR MODELO DE GEV

Tabela A-5. Parâmetros de ajuste do melhor modelo de GEV, para a estação Porto Alegre, utilizando GEV-I.

Duração	GEV-I		
	μ	σ	ξ
5 min	8,991	1,794	0,129
10 min	13,492	3,297	0,024
15 min	17,299	4,473	-0,040
30 min	24,596	5,998	0,070
45 min	28,401	6,648	0,149
1 h	30,377	7,484	0,143
2 h	36,732	8,221	0,061
3 h	41,110	8,173	0,038
4 h	44,499	8,715	0,037
8 h	56,107	9,980	0,011
14 h	66,706	13,541	0,007
24 h	77,052	18,280	-0,109

Tabela A-6. Parâmetros de ajuste do melhor modelo de GEV, para a estação São Paulo, utilizando GEV-III.

Duração	GEV-III		
	μ	σ	ξ
1 h	28,891+0,212*t	7,174+0,063*t	-0,005
2 h	36,115+0,278*t	8,087+0,090*t	0,003
3 h	38,708+0,317*t	7,556+0,126*t	0,010
4 h	41,960+0,315*t	5,854+0,166*t	0,057
8 h	49,575+0,291*t	5,165+0,225*t	0,012
14 h	53,466+0,313*t	7,776+0,198*t	-0,006
24 h	60,486+0,370*t	8,635+0,235*t	0,028

D) INTENSIDADE MÁXIMA DE PRECIPITAÇÃO

Tabela A-7. Intensidade máxima de precipitação para a estação Porto Alegre, em mm/h, para os diferentes tempos de retorno.

Duração	Bemfica <i>et al.</i> (2000)					
	2anos	5anos	10anos	25anos	50anos	100anos
5 min	133,99	156,72	176,44	206,37	232,34	261,58
10 min	107,15	125,32	141,10	165,03	185,80	209,18
15 min	89,78	105,01	118,23	138,28	155,68	175,27
30 min	61,41	71,82	80,86	94,58	106,48	119,88
45 min	47,27	55,29	62,25	72,81	81,97	92,28
1 h	38,71	45,28	50,98	59,62	67,13	75,57
2 h	23,08	26,99	30,39	35,54	40,02	45,05
3 h	16,77	19,62	22,08	25,83	29,08	32,74
4 h	13,30	15,56	17,52	20,49	23,07	25,97
8 h	7,53	8,81	9,91	11,60	13,06	14,70
14 h	4,72	5,52	6,21	7,27	8,18	9,21
24 h	3,00	3,51	3,95	4,62	5,20	5,86
Duração	Helfer, Dornelles e Goldenfum (2017)					
	2anos	5anos	10anos	25anos	50anos	100anos
5 min	120,00	144,66	166,64	200,88	231,40	266,54
10 min	93,85	113,14	130,33	157,12	180,98	208,47
15 min	77,89	93,90	108,16	130,39	150,19	173,01
30 min	53,02	63,92	73,63	88,76	102,24	117,77
45 min	41,04	49,47	56,99	68,70	79,13	91,15
1 h	33,86	40,81	47,01	56,68	65,28	75,20
2 h	20,75	25,01	28,81	34,73	40,01	46,09
3 h	15,40	18,56	21,38	25,78	29,69	34,20
4 h	12,42	14,97	17,25	20,79	23,95	27,59
8 h	7,34	8,85	10,19	12,29	14,15	16,30
14 h	4,78	5,76	6,63	8,00	9,21	10,61
24 h	3,15	3,80	4,38	5,27	6,08	7,00
Duração	Silva (2022) – Estacionária - produzida no escopo deste trabalho					
	2anos	5anos	10anos	25anos	50anos	100anos
5 min	124,02	145,19	163,58	191,51	215,76	243,08
10 min	96,04	112,44	126,67	148,30	167,08	188,24
15 min	79,29	92,83	104,59	122,44	137,95	155,42
30 min	53,65	62,81	70,76	82,85	93,34	105,16
45 min	41,45	48,53	54,67	64,01	72,12	81,25
1 h	34,18	40,02	45,08	52,78	59,47	67,00
2 h	20,97	24,55	27,66	32,38	36,48	41,10
3 h	15,59	18,25	20,56	24,07	27,12	30,55
4 h	12,59	14,74	16,61	19,44	21,90	24,68
8 h	7,47	8,75	9,86	11,54	13,00	14,65
14 h	4,88	5,72	6,44	7,54	8,49	9,57
24 h	3,23	3,78	4,26	4,99	5,62	6,34

Tabela A-8. Intensidade máxima de precipitação para a estação São Paulo no período histórico, em mm/h, para os diferentes tempos de retorno.

Duração	Martinez (1999) <i>apud</i> São Paulo (2012)					
	2anos	5anos	10anos	25anos	50anos	100anos
1 h	39,28	51,78	60,06	70,51	78,27	85,97
2 h	23,40	31,06	36,13	42,53	47,28	52,00
3 h	16,83	22,42	26,13	30,82	34,29	37,74
4 h	13,20	17,65	20,59	24,32	27,08	29,82
8 h	7,21	9,71	11,38	13,47	15,03	16,58
14 h	4,36	5,92	6,95	8,26	9,23	10,19
24 h	2,67	3,65	4,30	5,12	5,73	6,34
Duração	Martinez e Piteri (2015) <i>apud</i> DAEE (2018)					
	2anos	5anos	10anos	25anos	50anos	100anos
1 h	39,62	53,71	63,04	74,82	83,56	92,24
2 h	24,22	32,98	38,77	46,10	51,54	56,93
3 h	17,71	24,11	28,35	33,71	37,68	41,62
4 h	14,07	19,13	22,49	26,73	29,87	33,00
8 h	7,93	10,73	12,59	14,94	16,68	18,40
14 h	4,93	6,64	7,77	9,19	10,25	11,30
24 h	3,10	4,15	4,84	5,72	6,37	7,01
Duração	Silva (2022) – Estacionária - produzida no escopo deste trabalho					
	2anos	5anos	10anos	25anos	50anos	100anos
1 h	44,28	52,14	59,00	69,47	78,61	88,95
2 h	28,01	32,98	37,32	43,94	49,72	56,26
3 h	20,82	24,52	27,74	32,67	36,97	41,83
4 h	16,72	19,69	22,28	26,23	29,68	33,59
8 h	9,64	11,35	12,84	15,12	17,11	19,36
14 h	6,09	7,17	8,11	9,55	10,81	12,23
24 h	3,88	4,57	5,18	6,09	6,90	7,80
Duração	Silva (2022) – Não-estacionária GEV-III - produzida no escopo deste trabalho					
	2anos	5anos	10anos	25anos	50anos	100anos
1 h	53,96	63,08	70,98	82,98	93,38	105,09
2 h	34,31	40,11	45,14	52,77	59,38	66,83
3 h	25,66	30,00	33,76	39,47	44,42	49,98
4 h	20,71	24,21	27,25	31,86	35,85	40,34
8 h	12,12	14,17	15,95	18,65	20,98	23,62
14 h	7,77	9,08	10,22	11,95	13,44	15,13
24 h	5,03	5,88	6,61	7,73	8,70	9,79

APÊNDICE II – VARIABILIDADE DA INTENSIDADE DE PRECIPITAÇÕES INTENSAS NO FUTURO USANDO DIFERENTES MODELOS CLIMÁTICOS

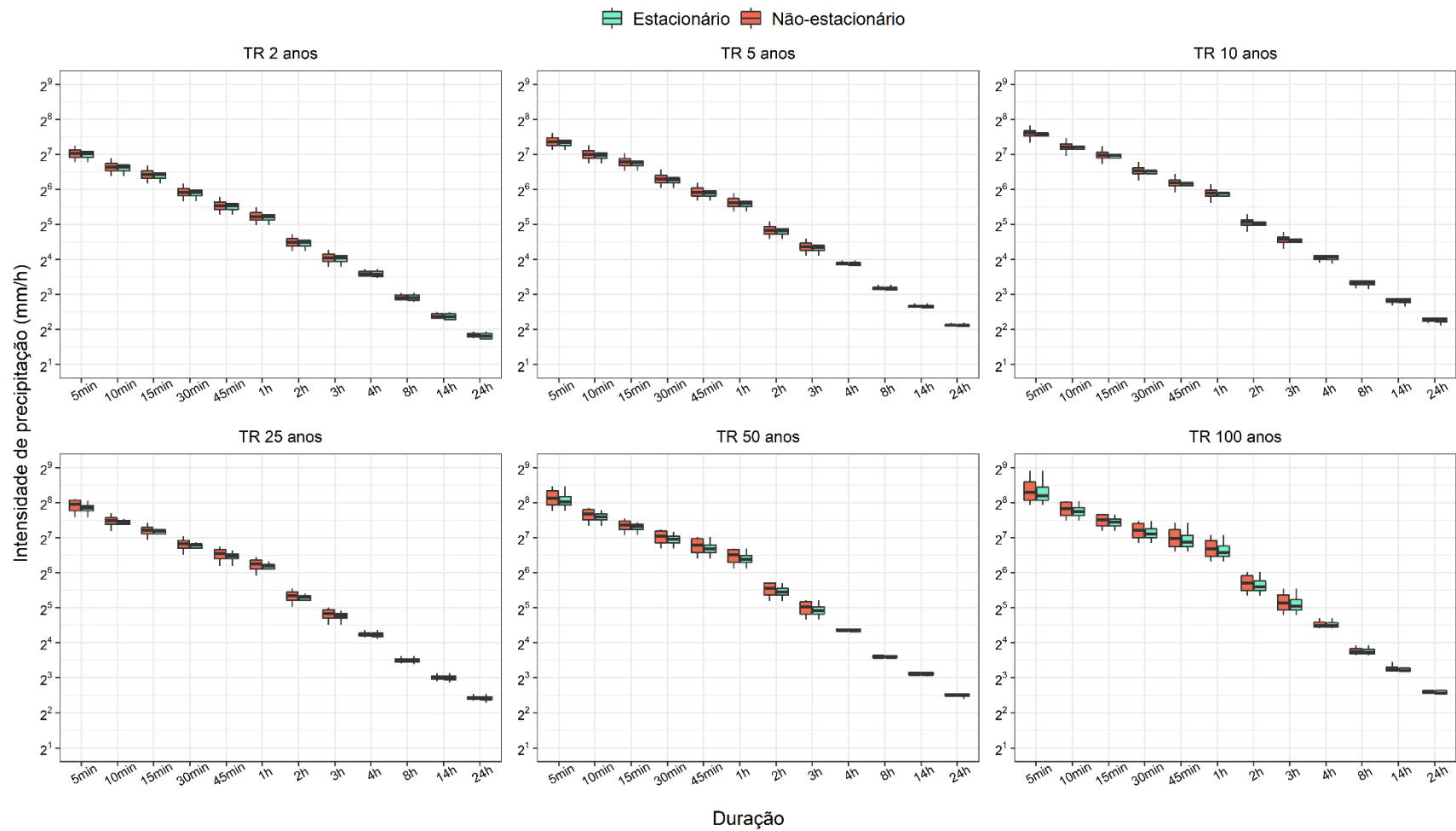


Figura A-3. Boxplots das intensidades de precipitação para estação Porto Alegre para diferentes tempos de retorno – RCP 4.5 (3-horas).

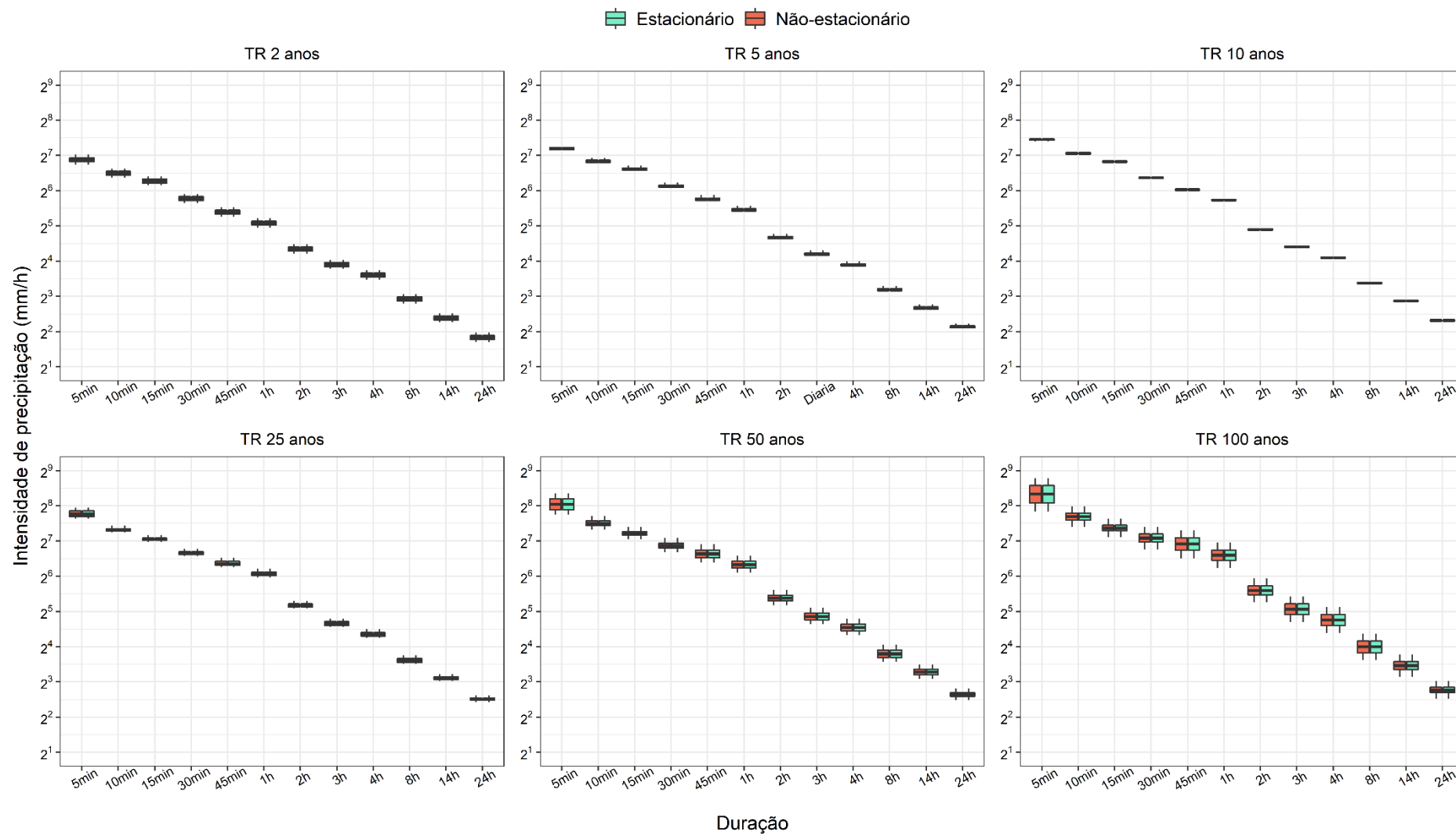


Figura A-4. *Boxplots* das intensidades de precipitação para estação Porto Alegre para diferentes tempos de retorno – RCP 4.5 (Diária).

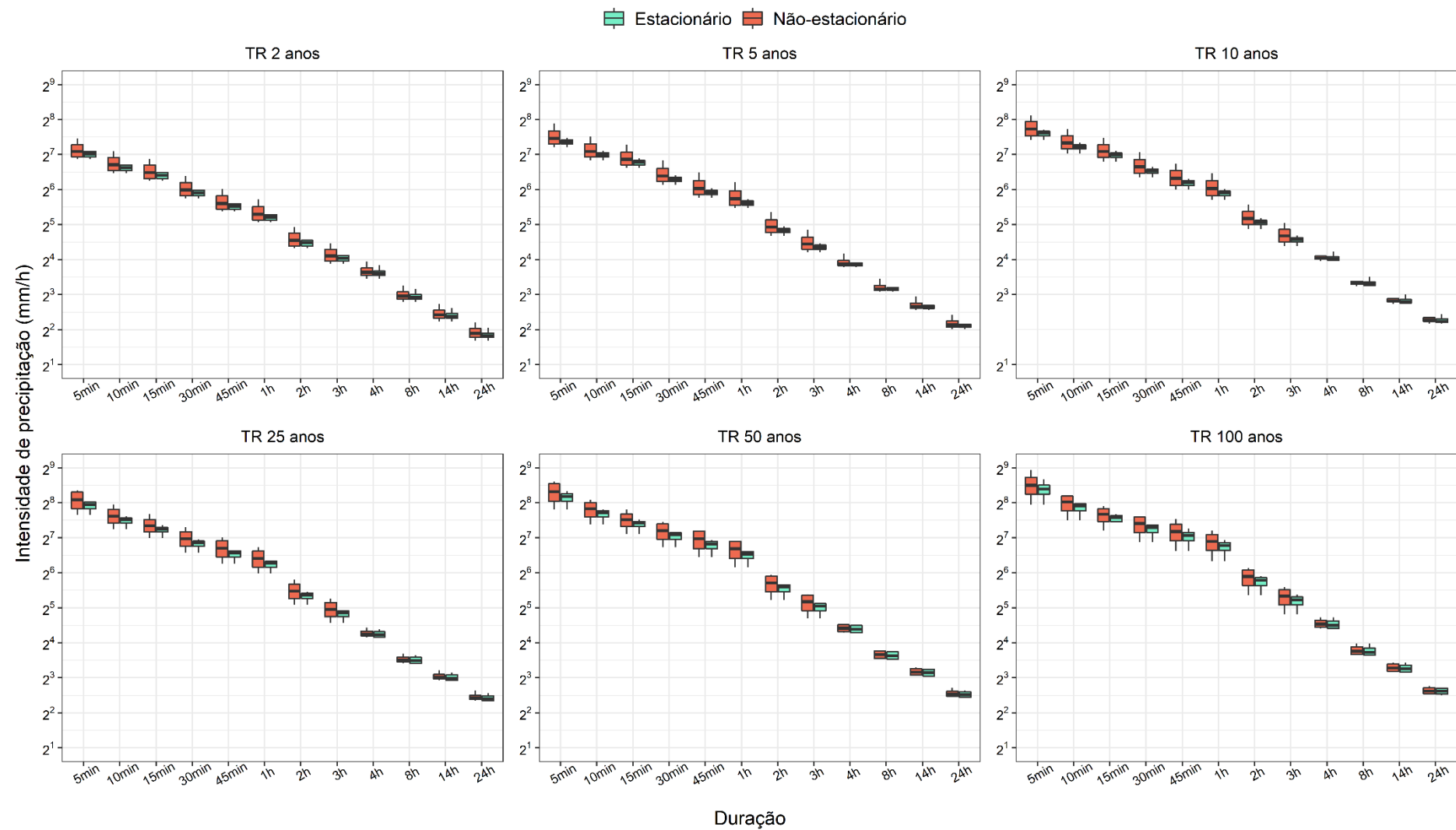


Figura A-5. *Boxplots* das intensidades de precipitação para estação Porto Alegre para diferentes tempos de retorno – RCP 8.5 (3-horas).

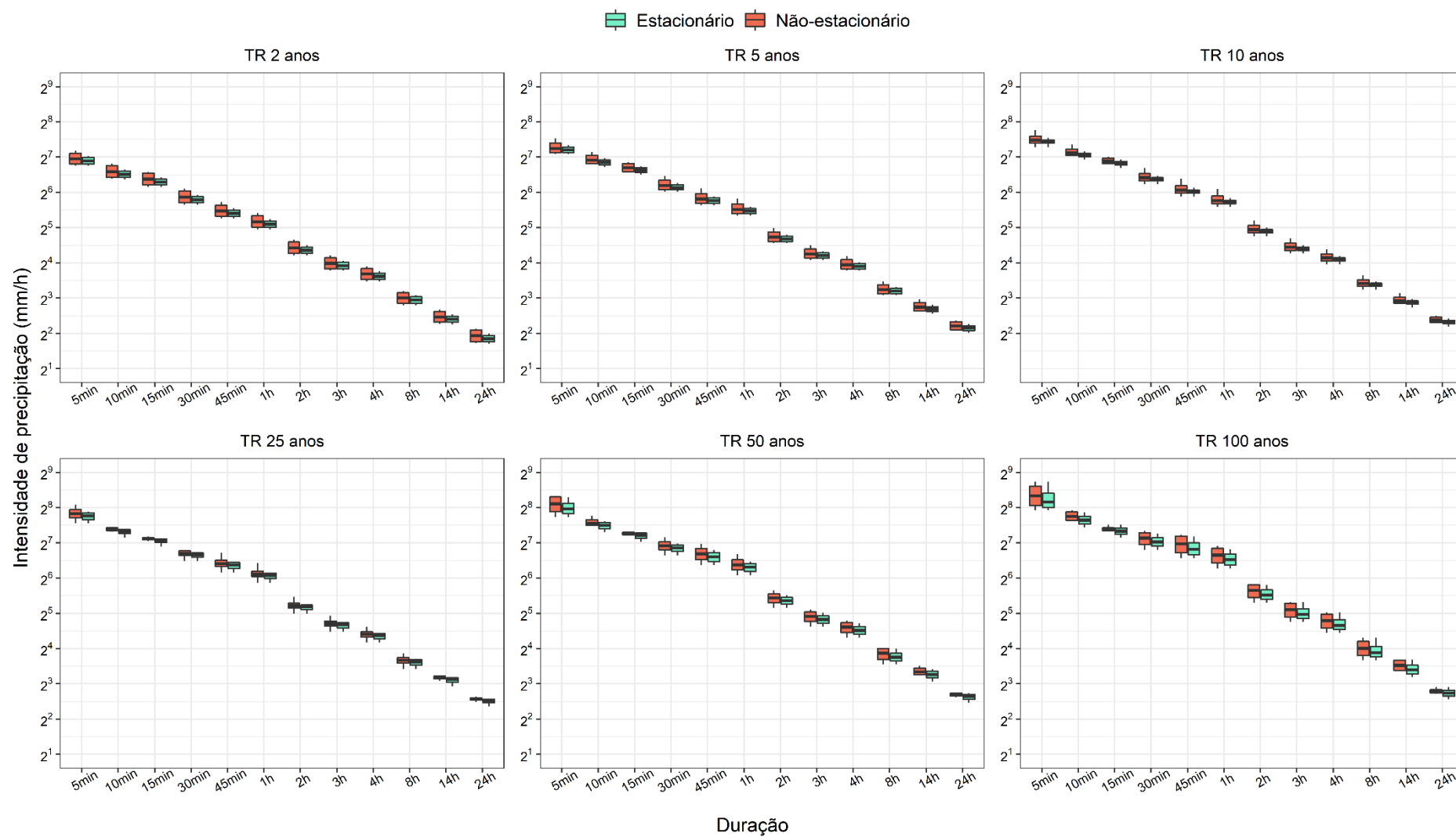


Figura A-6. *Boxplots* das intensidades de precipitação para estação Porto Alegre para diferentes tempos de retorno – RCP 8.5 (Diária).

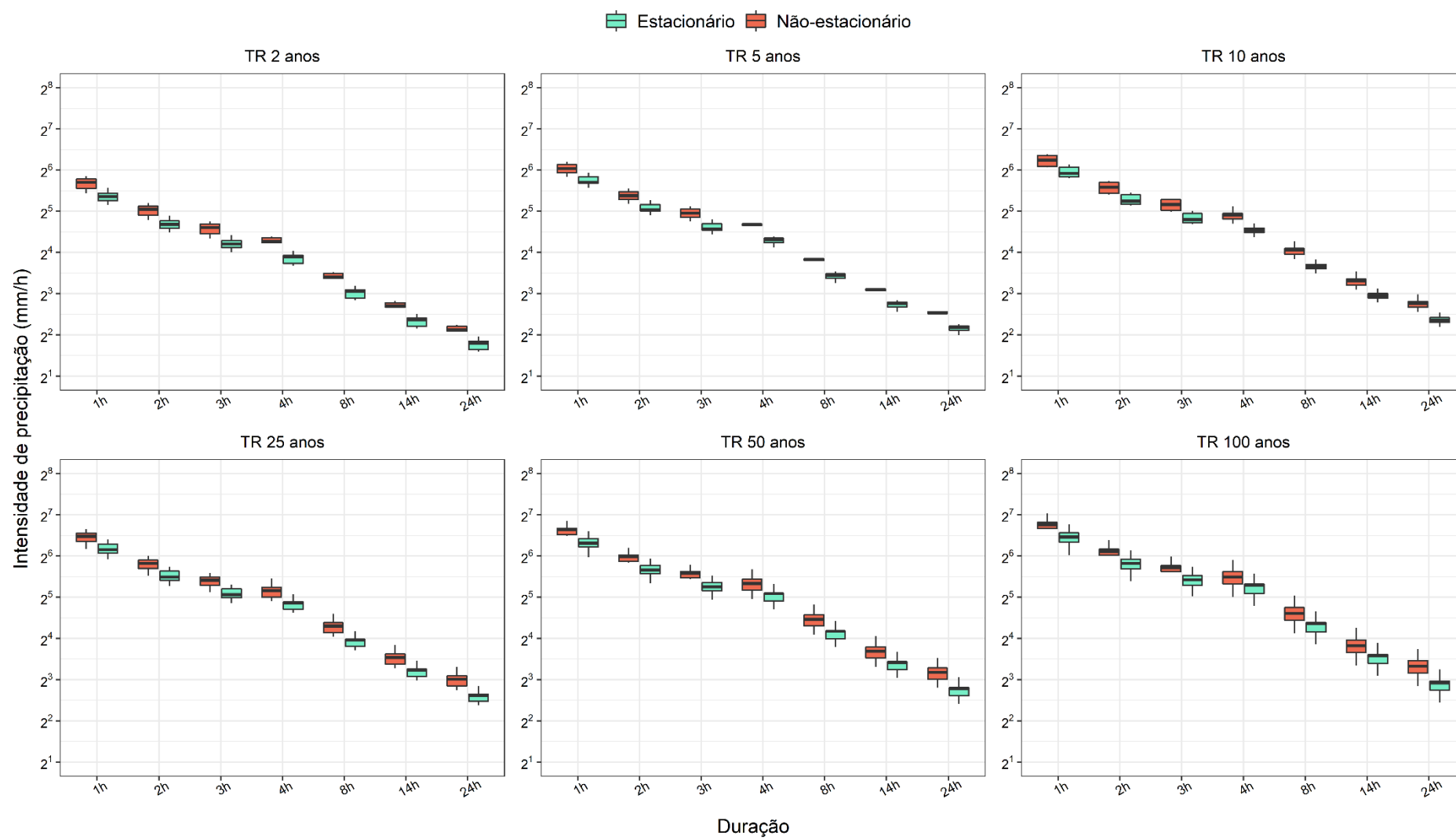


Figura A-7. *Boxplots* das intensidades de precipitação para estação São Paulo para diferentes tempos de retorno - RCP 4.5 (3-horas).

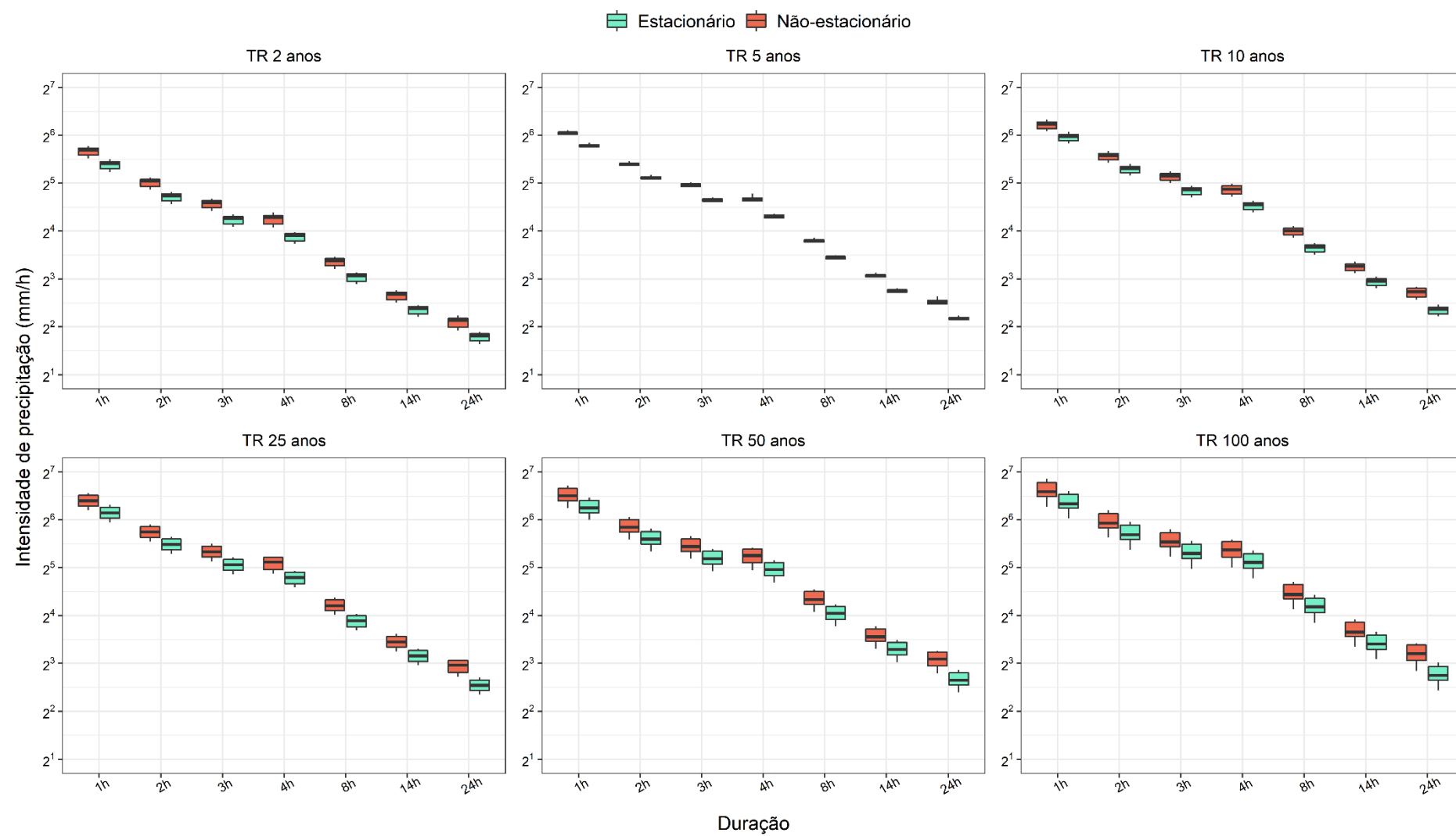


Figura A-8. *Boxplots* das intensidades de precipitação para estação São Paulo para diferentes tempos de retorno – RCP 4.5 (Diária).

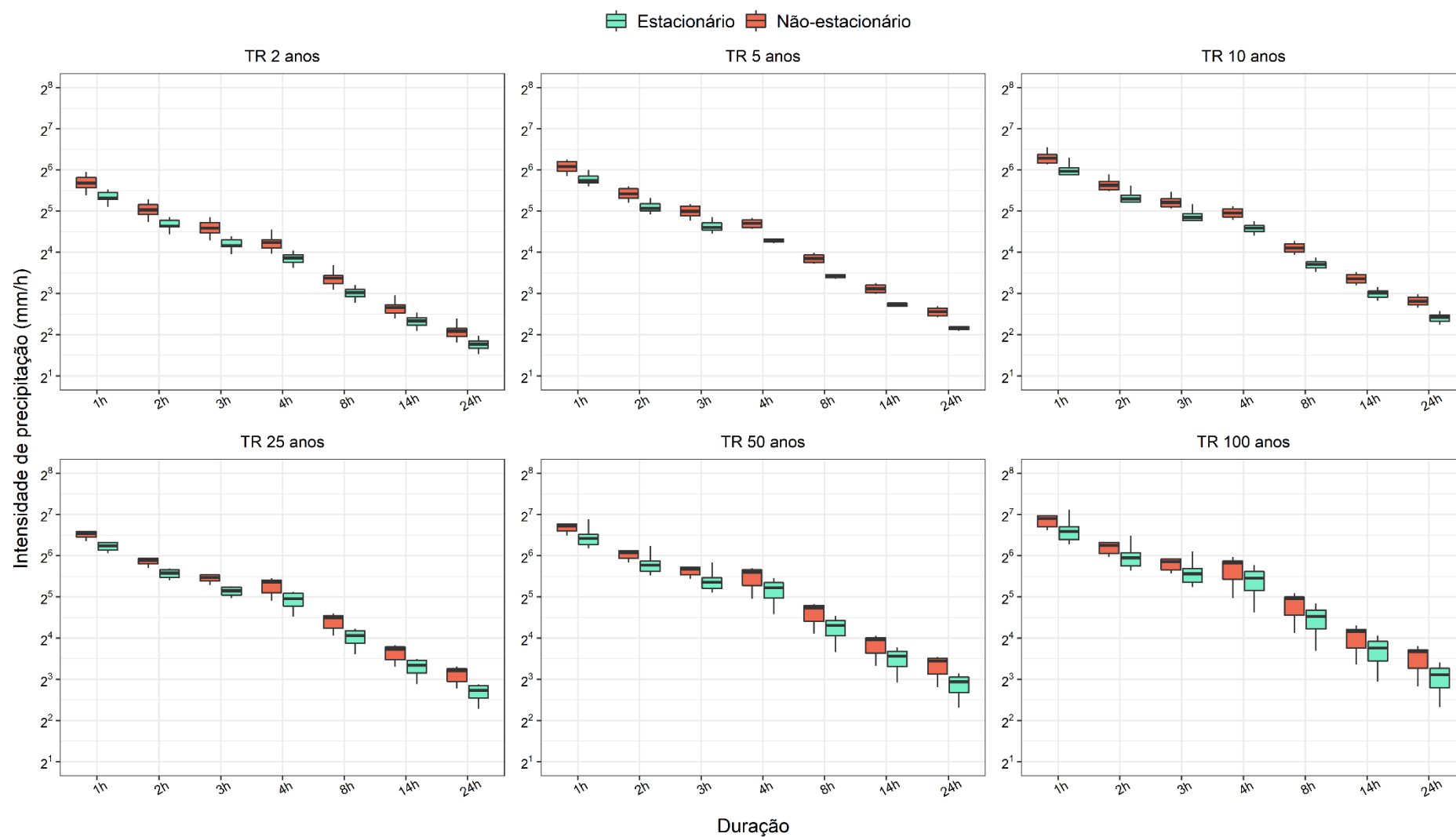


Figura A-9. *Boxplots* das intensidades de precipitação para estação São Paulo para diferentes tempos de retorno – RCP 8.5 (3-horas).

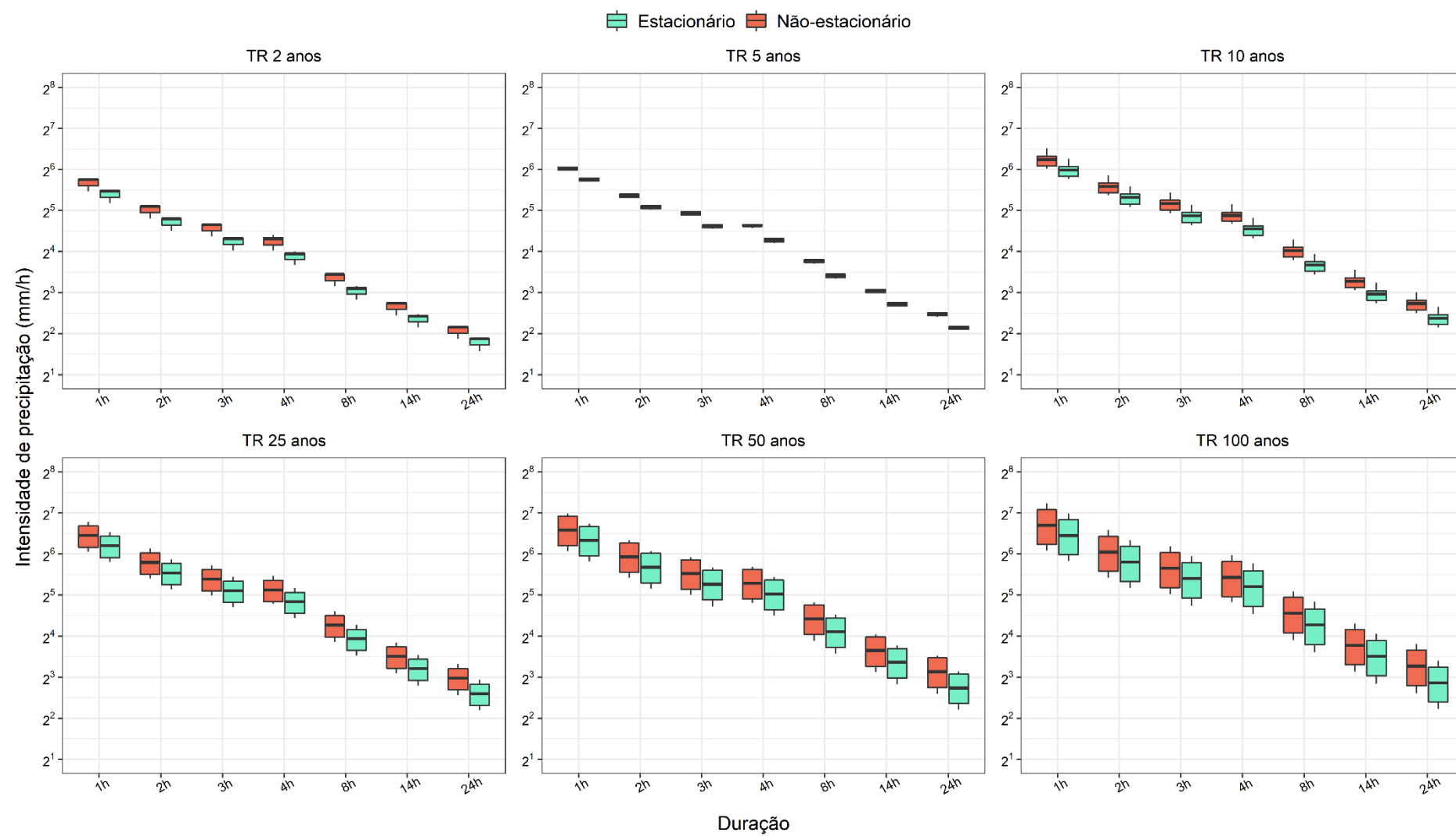


Figura A-10. *Boxplots* das intensidades de precipitação para estação São Paulo para diferentes tempos de retorno – RCP 8.5 (Diária).

**APÊNDICE III - ANÁLISE DE TENDÊNCIA ÀS SÉRIES DE PRECIPITAÇÕES
MÁXIMAS ANUAIS PARA O PERÍODO FUTURO – MEDIANA DOS MODELOS
(2020-2099)**

A) CRITÉRIO DE INFORMAÇÃO AKAIKE

A.1 Valores de CIA

Tabela A-9. Valores de CIA para os diferentes modelos de GEV em séries futuras para a estação Porto Alegre (RCP 4.5 3-horas).

Duração	CIA					
	I	II	III	IV	V	VI
5 min	382,16	382,25	375,12	375,61	381,38	381,42
10 min	469,92	468,94	462,63	462,96	468,53	468,58
15 min	512,92	511,14	505,60	505,83	511,20	511,26
30 min	569,82	569,35	562,62	563,01	568,70	568,74
45 min	593,32	593,54	586,35	586,86	592,64	592,68
1 h	611,72	611,89	604,73	605,23	611,01	611,04
2 h	619,54	618,98	612,31	612,69	618,37	618,41
3 h	616,76	615,98	609,49	609,85	615,48	615,52
4 h	613,27	614,57	613,33	613,12	614,24	614,17
8 h	633,28	634,50	633,24	633,04	634,15	634,07
14 h	681,26	682,45	681,19	680,99	682,10	682,02
24 h	718,70	719,33	718,13	717,96	718,99	718,84

Tabela A-10. Valores de CIA para os diferentes modelos de GEV em séries futuras para a estação Porto Alegre (RCP 4.5 Diária).

Duração	CIA					
	I	II	III	IV	V	VI
5 min	361,95	363,01	364,82	364,84	363,85	363,86
10 min	450,02	451,02	452,94	452,94	451,94	451,94
15 min	492,63	493,61	495,58	495,58	494,55	494,55
30 min	550,45	551,46	553,34	553,35	552,36	552,36
45 min	574,59	575,63	577,45	577,47	576,47	576,47
1 h	593,21	594,25	596,07	596,09	595,09	595,10
2 h	599,51	600,51	602,40	602,41	601,41	604,41
3 h	595,51	596,50	598,41	598,42	597,42	597,42
4 h	605,53	606,53	608,44	608,44	607,44	607,45
8 h	623,91	624,90	626,83	626,84	625,83	625,83
14 h	673,31	674,29	676,23	676,23	675,22	675,22
24 h	710,43	711,43	713,43	713,43	712,34	712,34

Tabela A-11. Valores de CIA para os diferentes modelos de GEV em séries futuras para a estação Porto Alegre (RCP 8.5 3-horas).

Duração	CIA					
	I	II	III	IV	V	VI
5 min	389,47	388,95	376,60	376,50	386,82	386,32
10 min	476,65	474,49	463,89	463,95	473,45	473,01
15 min	519,74	516,40	507,15	507,30	516,29	515,91
30 min	576,33	574,93	563,51	563,49	573,34	572,87
45 min	599,69	599,39	586,83	586,70	597,12	596,62
1 h	617,87	617,49	605,01	604,89	615,25	614,76
2 h	626,53	625,01	613,71	613,71	623,52	623,05
3 h	624,57	622,71	611,77	611,80	621,46	621,00
4 h	603,14	599,31	601,13	601,11	603,34	603,26
8 h	621,77	617,96	619,81	619,80	622,01	621,94
14 h	672,28	668,33	670,25	670,25	672,40	672,32
24 h	713,08	709,10	711,06	711,05	713,05	712,98

Tabela A-12. Valores de CIA para os diferentes modelos de GEV em séries futuras para a estação Porto Alegre (RCP 8.5 Diária).

Duração	CIA					
	I	II	III	IV	V	VI
5 min	367,28	361,31	362,31	362,16	367,49	367,34
10 min	458,06	451,46	453,03	452,99	458,44	458,31
15 min	502,03	495,28	497,06	497,04	502,61	502,50
30 min	557,47	551,00	552,40	552,33	557,72	557,58
45 min	579,91	573,74	574,80	574,66	579,96	579,80
1 h	598,73	592,49	593,60	593,47	598,78	598,62
2 h	606,73	600,28	601,69	601,62	607,01	606,87
3 h	603,24	596,86	598,28	598,22	603,63	603,50
4 h	613,29	606,93	608,34	608,28	613,69	613,56
8 h	632,42	626,08	627,54	627,48	632,91	632,79
14 h	681,91	675,38	676,94	676,90	682,35	682,23
24 h	721,77	714,96	716,88	716,87	722,55	722,46

Tabela A-13. Valores de CIA para os diferentes modelos de GEV em séries futuras para a estação São Paulo (RCP 4.5 3-horas).

Duração	CIA					
	I	II	III	IV	V	VI
1 h	676,81	676,18	677,83	677,86	677,45	677,53
2 h	713,55	712,90	714,58	714,61	714,19	714,27
3 h	735,88	735,22	736,90	736,93	736,51	736,59
4 h	763,97	763,44	764,08	764,27	765,71	765,73
8 h	787,88	787,20	788,00	788,16	789,60	789,61
14 h	790,77	790,02	790,89	791,04	792,48	792,49
24 h	817,24	816,62	817,36	817,53	818,97	818,99

Tabela A-14. Valores de CIA para os diferentes modelos de GEV em séries futuras para a estação São Paulo (RCP 4.5 Diária).

Duração	CIA					
	I	II	III	IV	V	VI
1 h	676,54	677,08	679,06	679,06	678,30	678,33
2 h	713,48	714,02	715,99	716,00	715,24	715,23
3 h	735,76	736,30	738,28	738,28	737,52	737,54
4 h	753,18	753,70	755,69	755,69	754,92	754,95
8 h	777,71	778,24	780,23	780,23	779,46	779,49
14 h	780,05	780,59	782,57	782,57	781,81	781,84
24 h	806,81	807,34	809,33	809,33	808,57	808,59

Tabela A-15. Valores de CIA para os diferentes modelos de GEV em séries futuras para a estação São Paulo (RCP 8.5 3-horas).

Duração	CIA					
	I	II	III	IV	V	VI
1 h	673,32	672,80	674,77	674,77	675,10	675,09
2 h	709,97	709,45	711,42	711,42	711,74	711,73
3 h	732,55	732,03	734,00	734,00	734,32	734,31
4 h	760,39	760,29	760,11	760,21	761,82	761,81
8 h	784,34	784,07	784,08	784,17	785,76	785,74
14 h	787,13	786,78	786,89	786,98	788,54	788,53
24 h	813,68	813,47	813,41	813,51	815,11	815,09

Tabela A-16. Valores de CIA para os diferentes modelos de GEV em séries futuras para a estação São Paulo (RCP 8.5 Diária).

Duração	CIA					
	I	II	III	IV	V	VI
1 h	678,59	679,63	677,48	677,39	678,68	678,57
2 h	715,43	716,50	714,31	714,23	715,54	715,43
3 h	737,73	738,84	736,61	736,52	737,85	737,74
4 h	754,85	756,14	753,69	753,59	755,04	754,93
8 h	779,90	781,01	778,77	778,68	780,02	779,91
14 h	782,29	783,33	781,18	781,10	782,39	782,28
24 h	808,82	809,99	807,67	807,58	808,96	808,85

A.2 Valores de CIAC

Tabela A-17. Valores de CIAC para os diferentes modelos de GEV em séries futuras para a estação Porto Alegre (RCP 4.5 3-horas).

Duração	CIA					
	I	II	III	IV	V	VI
5 min	382,48	382,78	375,93	376,72	381,92	381,95
10 min	470,23	469,48	463,44	463,76	469,07	469,12
15 min	513,24	511,67	506,41	506,64	511,73	511,79
30 min	570,14	569,88	563,43	563,82	569,23	569,27
45 min	593,64	594,07	587,16	587,67	593,17	593,21
1 h	612,04	612,42	605,54	606,04	611,54	611,57
2 h	619,85	619,51	613,12	613,50	618,90	618,94
3 h	617,08	616,52	610,31	610,66	616,01	616,06
4 h	613,59	615,11	614,14	613,94	614,77	614,70
8 h	633,60	635,03	634,05	633,86	634,68	634,60
14 h	681,57	682,98	682,00	681,80	682,64	682,55
24 h	719,02	719,87	718,94	718,77	719,52	719,37

Tabela A-18. Valores de CIAC para os diferentes modelos de GEV em séries futuras para a estação Porto Alegre (RCP 4.5 Diária).

Duração	CIA					
	I	II	III	IV	V	VI
5 min	362,27	363,54	365,63	365,65	364,39	364,39
10 min	450,34	451,55	453,75	453,75	452,47	452,47
15 min	492,94	494,14	496,39	496,39	495,08	495,08
30 min	550,77	552,00	554,15	554,16	552,89	552,89
45 min	574,90	576,16	578,26	578,28	577,00	577,00
1 h	593,53	594,79	596,88	596,90	595,63	595,63
2 h	599,82	601,04	603,21	603,22	601,94	601,95
3 h	595,82	597,04	599,22	599,23	597,95	597,95
4 h	605,85	607,06	609,25	609,25	607,98	607,98
8 h	624,22	625,43	627,64	627,65	626,36	626,36
14 h	673,62	674,82	677,04	677,04	675,75	675,75
24 h	710,75	711,97	714,24	714,24	712,88	712,88

Tabela A-19. Valores de CIAC para os diferentes modelos de GEV em séries futuras para a estação Porto Alegre (RCP 8.5 3-horas).

Duração	CIA					
	I	II	III	IV	V	VI
5 min	389,79	389,48	377,41	377,31	387,35	386,85
10 min	476,97	475,03	464,70	464,76	473,99	473,54
15 min	520,05	516,93	507,96	508,11	516,82	516,45
30 min	576,34	575,47	564,31	564,30	573,88	573,40
45 min	600,00	599,92	587,64	587,51	597,65	597,15
1 h	618,18	618,02	605,82	605,70	615,79	615,29
2 h	626,85	625,55	614,52	614,52	624,05	623,58
3 h	624,88	623,24	612,58	612,61	622,00	621,54
4 h	603,46	599,85	601,94	601,92	603,87	603,80
8 h	622,09	618,50	620,63	620,61	622,54	622,47
14 h	672,60	668,87	671,07	671,06	672,93	672,86
24 h	713,39	709,64	711,87	711,87	713,58	713,52

Tabela A-20. Valores de CIAC para os diferentes modelos de GEV em séries futuras para a estação Porto Alegre (RCP 8.5 Diária).

Duração	CIA					
	I	II	III	IV	V	VI
5 min	367,59	361,85	363,12	362,97	368,02	367,88
10 min	458,37	451,99	453,84	453,80	458,97	458,84
15 min	502,34	495,81	497,87	497,85	503,14	503,03
30 min	557,79	551,53	553,22	553,14	558,25	558,11
45 min	580,23	574,27	575,61	575,47	580,49	580,34
1 h	599,04	593,02	594,41	594,28	599,32	599,16
2 h	607,04	600,81	602,50	602,43	607,54	607,41
3 h	603,56	597,39	599,09	599,03	604,16	604,03
4 h	613,61	607,46	609,15	609,09	614,22	614,09
8 h	632,74	626,61	628,35	628,29	633,44	633,32
14 h	682,23	675,91	677,75	677,71	682,89	682,76
24 h	722,08	715,49	717,69	717,68	723,08	722,94

Tabela A-21. Valores de CIAC para os diferentes modelos de GEV em séries futuras para a estação São Paulo (RCP 4.5 3-horas).

Duração	CIA					
	I	II	III	IV	V	VI
1 h	677,13	676,71	678,64	678,67	677,98	678,07
2 h	713,86	713,44	715,39	715,42	714,72	714,81
3 h	736,19	735,75	737,71	737,74	737,04	737,13
4 h	764,29	763,97	764,90	765,08	766,24	766,26
8 h	788,19	787,73	788,81	788,97	790,13	790,15
14 h	791,08	790,55	791,70	791,85	793,01	793,03
24 h	817,56	817,15	818,17	818,34	819,50	819,52

Tabela A-22. Valores de CIAC para os diferentes modelos de GEV em séries futuras para a estação São Paulo (RCP 4.5 Diária).

Duração	CIA					
	I	II	III	IV	V	VI
1 h	676,86	677,62	679,87	679,87	678,83	678,86
2 h	713,79	714,55	716,80	716,81	715,77	715,80
3 h	736,08	736,83	739,09	739,09	738,05	738,08
4 h	753,49	754,23	756,50	756,50	755,45	755,48
8 h	778,03	778,78	781,04	781,04	780,00	780,02
14 h	780,37	781,13	783,38	783,38	782,35	782,37
24 h	807,13	807,87	810,15	810,14	809,10	809,12

Tabela A-23. Valores de CIAC para os diferentes modelos de GEV em séries futuras para a estação São Paulo (RCP 8.5 3-horas).

Duração	CIA					
	I	II	III	IV	V	VI
1 h	673,63	673,33	675,58	675,58	675,63	675,62
2 h	710,28	709,99	712,23	712,23	712,28	712,26
3 h	732,87	732,57	734,81	734,81	734,86	734,84
4 h	760,70	760,82	760,93	761,03	762,36	762,34
8 h	784,66	784,60	784,89	784,98	786,29	786,28
14 h	787,45	787,31	787,70	787,79	789,07	789,06
24 h	814,00	814,00	814,22	814,32	815,64	815,62

Tabela A-24. Valores de CIAc para os diferentes modelos de GEV em séries futuras para a estação São Paulo (RCP 8.5 Diária).

Duração	CIA					
	I	II	III	IV	V	VI
1 h	678,91	680,16	678,29	678,20	678,22	679,11
2 h	715,75	717,04	715,12	715,04	716,07	715,96
3 h	738,05	739,37	737,42	737,33	738,38	738,27
4 h	755,17	756,67	754,50	754,40	755,57	755,46
8 h	780,22	781,55	779,58	779,49	780,55	780,44
14 h	782,61	783,86	781,99	781,91	782,92	782,81
24 h	809,13	810,53	808,48	808,39	809,49	809,38

A.3 Valores de Δ_i

Tabela A-25. Valores de Δ_i para os diferentes modelos de GEV em séries futuras para a estação Porto Alegre (RCP 4.5 3-horas).

Duração	CIA					
	I	II	III	IV	V	VI
5 min	6,55	6,85	0,00	0,49	5,99	6,02
10 min	6,79	6,03	0,00	0,32	5,63	5,68
15 min	6,83	5,26	0,00	0,23	5,33	5,38
30 min	6,71	6,45	0,00	0,39	5,80	5,84
45 min	6,47	6,91	0,00	0,51	6,01	6,05
1 h	6,49	6,88	0,00	0,50	6,00	6,03
2 h	6,73	6,39	0,00	0,38	5,78	5,82
3 h	6,77	6,21	0,00	0,35	5,70	5,75
4 h	0,00	1,52	0,55	0,35	1,18	1,11
8 h	0,00	1,43	0,46	0,26	1,09	1,00
14 h	0,00	1,41	0,43	0,23	1,07	0,98
24 h	0,25	1,10	0,17	0,00	0,75	0,61

Tabela A-26. Valores de Δ_i para os diferentes modelos de GEV em séries futuras para a estação Porto Alegre (RCP 4.5 Diária).

Duração	CIA					
	I	II	III	IV	V	VI
5 min	0,00	1,27	3,36	3,38	2,11	2,12
10 min	0,00	1,21	3,41	3,41	2,13	2,13
15 min	0,00	1,21	3,45	3,45	2,14	2,14
30 min	0,00	1,23	3,38	3,39	2,12	2,12
45 min	0,00	1,26	3,36	3,38	2,09	2,10
1 h	0,00	1,26	3,36	3,38	2,10	2,10
2 h	0,00	1,22	3,39	3,40	2,12	2,12
3 h	0,00	1,21	3,40	3,41	2,13	2,13
4 h	0,00	1,22	3,40	3,41	2,13	2,13
8 h	0,00	1,21	3,42	3,42	2,14	2,14
14 h	0,00	1,20	3,42	3,42	2,13	2,13
24 h	0,00	1,22	3,50	3,50	2,13	2,13

Tabela A-27. Valores de Δ_i para os diferentes modelos de GEV em séries futuras para a estação Porto Alegre (RCP 8.5 3-horas).

Duração	CIA					
	I	II	III	IV	V	VI
5 min	12,48	12,17	0,10	0,00	10,05	9,55
10 min	12,26	10,32	0,00	0,06	9,29	8,84
15 min	12,09	8,97	0,00	0,15	8,86	8,48
30 min	12,35	11,17	0,01	0,00	9,58	9,10
45 min	12,49	12,41	0,13	0,00	10,14	9,64
1 h	12,48	12,32	0,12	0,00	10,09	9,59
2 h	12,33	11,03	0,00	0,00	9,53	9,06
3 h	12,31	10,67	0,00	0,03	9,42	8,96
4 h	3,61	0,00	2,09	2,07	4,02	3,95
8 h	3,59	0,00	2,13	2,12	4,04	3,97
14 h	3,73	0,00	2,20	2,19	4,06	3,99
24 h	3,76	0,00	2,23	2,23	3,95	3,88

Tabela A-28. Valores de Δ_i para os diferentes modelos de GEV em séries futuras para a estação Porto Alegre (RCP 8.5 Diária).

Duração	CIA					
	I	II	III	IV	V	VI
5 min	5,85	0,00	1,27	1,13	6,17	6,036
10 min	6,38	0,00	1,85	1,81	6,98	6,86
15 min	6,54	0,00	2,10	2,04	7,33	7,22
30 min	6,26	0,00	1,68	1,61	6,72	6,58
45 min	5,95	0,00	1,37	1,19	6,22	6,10
1 h	6,02	0,00	1,39	1,26	6,29	6,13
2 h	6,23	0,00	1,68	1,62	6,73	6,59
3 h	6,16	0,00	1,70	1,64	6,77	6,64
4 h	6,15	0,00	1,70	1,63	6,76	6,63
8 h	6,12	0,00	1,74	1,68	6,83	6,71
14 h	6,31	0,00	1,84	1,80	6,98	6,85
24 h	6,59	0,00	2,19	2,19	7,58	7,50

Tabela A-29. Valores de Δ_i para os diferentes modelos de GEV em séries futuras para a estação São Paulo (RCP 4.5 3-horas).

Duração	CIA					
	I	II	III	IV	V	VI
1 h	0,42	0,00	1,93	1,96	1,27	1,36
2 h	0,43	0,00	1,95	1,98	1,29	1,37
3 h	0,44	0,00	1,96	1,99	1,29	1,38
4 h	0,31	0,00	0,92	1,11	2,27	2,29
8 h	0,46	0,00	1,07	1,24	2,40	2,41
14 h	0,53	0,00	1,15	1,30	2,46	2,48
24 h	0,41	0,00	1,02	1,19	2,35	2,37

Tabela A-30. Valores de Δ_i para os diferentes modelos de GEV em séries futuras para a estação São Paulo (RCP 4.5 Diária).

Duração	CIA					
	I	II	III	IV	V	VI
1 h	0,00	0,76	3,01	3,01	1,98	2,00
2 h	0,00	0,76	3,01	3,01	1,97	2,00
3 h	0,00	0,75	3,01	3,01	1,97	2,00
4 h	0,00	0,74	3,01	3,01	1,96	1,99
8 h	0,00	0,75	3,01	3,01	1,97	2,00
14 h	0,00	0,76	3,01	3,01	1,98	2,00
24 h	0,00	0,74	3,02	3,01	1,97	1,99

Tabela A-31. Valores de Δ_i para os diferentes modelos de GEV em séries futuras para a estação São Paulo (RCP 8.5 3-horas).

Duração	CIA					
	I	II	III	IV	V	VI
1 h	0,30	0,00	2,25	2,25	2,30	2,29
2 h	0,29	0,00	2,24	2,24	2,29	2,27
3 h	0,30	0,00	2,24	2,24	2,29	2,27
4 h	0,00	0,12	0,22	0,32	1,65	1,64
8 h	0,06	0,00	0,29	0,38	1,69	1,67
14 h	0,14	0,00	0,39	0,48	1,76	1,75
24 h	0,00	0,01	0,23	0,32	1,65	1,62

Tabela A-32. Valores de Δ_i para os diferentes modelos de GEV em séries futuras para a estação São Paulo (RCP 8.5 Diária).

Duração	CIA					
	I	II	III	IV	V	VI
1 h	0,70	1,96	0,08	0,00	1,01	0,90
2 h	0,71	2,00	0,08	0,00	1,03	0,92
3 h	0,72	2,04	0,09	0,00	1,05	0,94
4 h	0,77	2,26	0,10	0,00	1,17	1,06
8 h	0,72	2,05	0,10	0,00	1,06	0,95
14 h	0,70	1,96	0,08	0,00	1,01	0,90
24 h	0,74	2,13	0,09	0,00	1,10	0,99

A.4 Valores de significância estatística (p-valor)

Tabela A-33. Significância estatística (p-valor) comparando os diferentes modelos de GEV, para séries futuras da estação Porto Alegre (RCP 4.5 3-horas).

Duração	p-valor				
	I x II	I x III	I x IV	I x V	I x VI
5 min	0,1700	0,0040	0,0050	0,0950	0,0970
10 min	0,0850	0,0035	0,0042	0,0660	0,0680
15 min	0,0520	0,0035	0,0039	0,0540	0,0550
30 min	0,1160	0,0037	0,0045	0,0770	0,0790
45 min	0,1820	0,0041	0,0054	0,1017	0,1039
1 h	0,1762	0,0041	0,0053	0,0995	0,1017
2 h	0,1097	0,0036	0,0044	0,0750	0,0770
3 h	0,0954	0,0036	0,0043	0,0698	0,0718
4 h	0,4038	0,1394	0,1257	0,3095	0,2933
8 h	0,3761	0,1328	0,1202	0,2875	0,2710
14 h	0,3699	0,1310	0,1184	0,2837	0,2661
24 h	0,2423	0,1016	0,0934	0,1903	0,1727

Tabela A-34. Significância estatística (p-valor) comparando os diferentes modelos de GEV, para séries futuras da estação Porto Alegre (RCP 4.5 Diária).

Duração	p-valor				
	I x II	I x III	I x IV	I x V	I x VI
5 min	0,3301	0,5672	0,5725	0,7491	0,7550
10 min	0,3155	0,5807	0,5824	0,7668	0,7711
15 min	0,3132	0,5923	0,5929	0,7753	0,7787
30 min	0,3196	0,5739	0,5768	0,7553	0,7604
45 min	0,3280	0,5659	0,5714	0,7268	0,7335
1 h	0,3278	0,5663	0,5717	0,7302	0,7368
2 h	0,3180	0,5752	0,5778	0,7559	0,7609
3 h	0,3168	0,5787	0,5807	0,7664	0,7709
4 h	0,3169	0,5790	0,5809	0,7678	0,7723
8 h	0,3153	0,5836	0,5849	0,7749	0,7789
14 h	0,3132	0,5838	0,5849	0,7651	0,7692
24 h	0,3179	0,6071	0,6071	0,7671	0,7698

Tabela A-35. Significância estatística (p-valor) comparando os diferentes modelos de GEV, para séries futuras da estação Porto Alegre (RCP 8.5 3-horas).

Duração	p-valor				
	I x II	I x III	I x IV	I x V	I x VI
5 min	0,1119	0,0002	0,0002	0,0310	0,0232
10 min	0,0415	0,0000	0,0000	0,0226	0,0176
15 min	0,0209	0,0002	0,0003	0,0196	0,0158
30 min	0,0654	0,0002	0,0002	0,0256	0,0194
45 min	0,1294	0,0002	0,0002	0,0325	0,0243
1 h	0,1232	0,0002	0,0002	0,0318	0,0238
2 h	0,0606	0,0002	0,0002	0,0251	0,0191
3 h	0,0495	0,0002	0,0002	0,0238	0,0183
4 h	0,0158	0,0494	0,0490	0,1791	0,1704
8 h	0,0159	0,0508	0,0505	0,1837	0,1754
14 h	0,0148	0,0491	0,0489	0,1701	0,1616
24 h	0,0145	0,0493	0,0493	0,1547	0,1480

Tabela A-36. Significância estatística (p-valor) comparando os diferentes modelos de GEV, para séries futuras da estação Porto Alegre (RCP 8.5 Diária).

Duração	p-valor				
	I x II	I x III	I x IV	I x V	I x VI
5 min	0,0048	0,0113	0,0105	0,1806	0,1641
10 min	0,0034	0,0110	0,0107	0,2036	0,1863
15 min	0,0031	0,0113	0,0112	0,2331	0,2160
30 min	0,0036	0,0107	0,0104	0,1856	0,1686
45 min	0,0042	0,0105	0,0098	0,1628	0,1468
1 h	0,0041	0,0104	0,0098	0,1631	0,1470
2 h	0,0037	0,0109	0,0105	0,1902	0,1732
3 h	0,0038	0,0113	0,0110	0,2041	0,1868
4 h	0,0038	0,0114	0,0110	0,2055	0,1883
8 h	0,0039	0,0118	0,0114	0,2193	0,2019
14 h	0,0035	0,0113	0,0110	0,2123	0,1950
24 h	0,0030	0,0117	0,0117	0,2695	0,2532

Tabela A-37. Significância estatística (p-valor) comparando os diferentes modelos de GEV, para séries futuras da estação São Paulo (RCP 4.5 3-horas).

Duração	p-valor				
	I x II	I x III	I x IV	I x V	I x VI
1 h	0,10	0,22	0,23	0,24	0,26
2 h	0,10	0,23	0,23	0,24	0,26
3 h	0,10	0,23	0,23	0,24	0,26
4 h	0,11	0,14	0,16	0,61	0,62
8 h	0,10	0,14	0,16	0,60	0,61
14 h	0,10	0,14	0,16	0,59	0,60
24 h	0,11	0,14	0,16	0,60	0,61

Tabela A-38. Significância estatística (p-valor) comparando os diferentes modelos de GEV, para séries futuras da estação São Paulo (RCP 4.5 Diária).

Duração	p-valor				
	I x II	I x III	I x IV	I x V	I x VI
1 h	0,23	0,48	0,48	0,62	0,64
2 h	0,23	0,47	0,48	0,62	0,64
3 h	0,23	0,48	0,48	0,62	0,64
4 h	0,22	0,48	0,48	0,61	0,63
8 h	0,22	0,48	0,48	0,62	0,64
14 h	0,23	0,48	0,48	0,62	0,64
24 h	0,22	0,48	0,48	0,62	0,64

Tabela A-39. Significância estatística (p-valor) comparando os diferentes modelos de GEV, para séries futuras da estação São Paulo (RCP 8.5 3-horas).

Duração	p-valor				
	I x II	I x III	I x IV	I x V	I x VI
1 h	0,11	0,28	0,28	0,64	0,63
2 h	0,11	0,28	0,28	0,64	0,63
3 h	0,11	0,28	0,28	0,63	0,62
4 h	0,15	0,12	0,12	0,45	0,45
8 h	0,13	0,12	0,12	0,44	0,44
14 h	0,12	0,12	0,13	0,44	0,44
24 h	0,14	0,12	0,12	0,45	0,44

Tabela A-40. Significância estatística (p-valor) comparando os diferentes modelos de GEV, para séries futuras da estação São Paulo (RCP 8.5 Diária).

Duração	p-valor				
	I x II	I x III	I x IV	I x V	I x VI
1 h	0,33	0,08	0,07	0,17	0,16
2 h	0,33	0,08	0,07	0,17	0,16
3 h	0,34	0,08	0,07	0,17	0,16
4 h	0,39	0,08	0,07	0,18	0,16
8 h	0,35	0,08	0,07	0,17	0,16
14 h	0,33	0,08	0,07	0,17	0,16
24 h	0,36	0,08	0,07	0,17	0,16

A.5 Coeficiente de Determinação (Gráfico QQ)

Tabela A-41. Coeficiente de determinação do melhor modelo de GEV para séries futuras da estação Porto Alegre (RCP 4.5 3-horas).

Duração	R_{QQ}^2
5 min	0,986
10 min	0,986
15 min	0,986
30 min	0,986
45 min	0,986
1h	0,986
2h	0,987
3 h	0,987
4 h	0,976
8 h	0,979
14 h	0,978
24 h	0,984

Tabela A-42. Coeficiente de determinação do melhor modelo de GEV para séries futuras da estação Porto Alegre (RCP 4.5 Diária).

Duração	R_{QQ}^2
5 min	0,9805
10 min	0,9877
15 min	0,9905
30 min	0,9846
45 min	0,9764
1h	0,9772
2h	0,9853
3 h	0,9871
4 h	0,9873
8 h	0,9888
14 h	0,9886
24 h	0,9924

Tabela A-43. Coeficiente de determinação do melhor modelo de GEV para séries futuras da estação Porto Alegre (RCP 8.5 3-horas).

Duração	R_{QQ}^2
5 min	0,990
10 min	0,987
15 min	0,984
30 min	0,988
45 min	0,990
1h	0,990
2h	0,988
3 h	0,988
4 h	0,990
8 h	0,990
14 h	0,989
24 h	0,987

Tabela A-44. Coeficiente de determinação do melhor modelo de GEV para séries futuras da estação Porto Alegre (RCP 8.5 Diária).

Duração	R_{QQ}^2
5 min	0,9889
10 min	0,9891
15 min	0,9897
30 min	0,9888
45 min	0,9886
1h	0,9886
2h	0,9889
3 h	0,9891
4 h	0,9892
8 h	0,9893
14 h	0,9892
24 h	0,9905

Tabela A-45. Coeficiente de determinação do melhor modelo de GEV para séries futuras da estação São Paulo (RCP 4.5 3-horas).

Duração	R_{QQ}^2
1h	0,9788
2h	0,9784
3 h	0,9778
4 h	0,9888
8 h	0,9990
14 h	0,9903
24 h	0,9896

Tabela A-46. Coeficiente de determinação do melhor modelo de GEV para séries futuras da estação São Paulo (RCP 4.5 Diária).

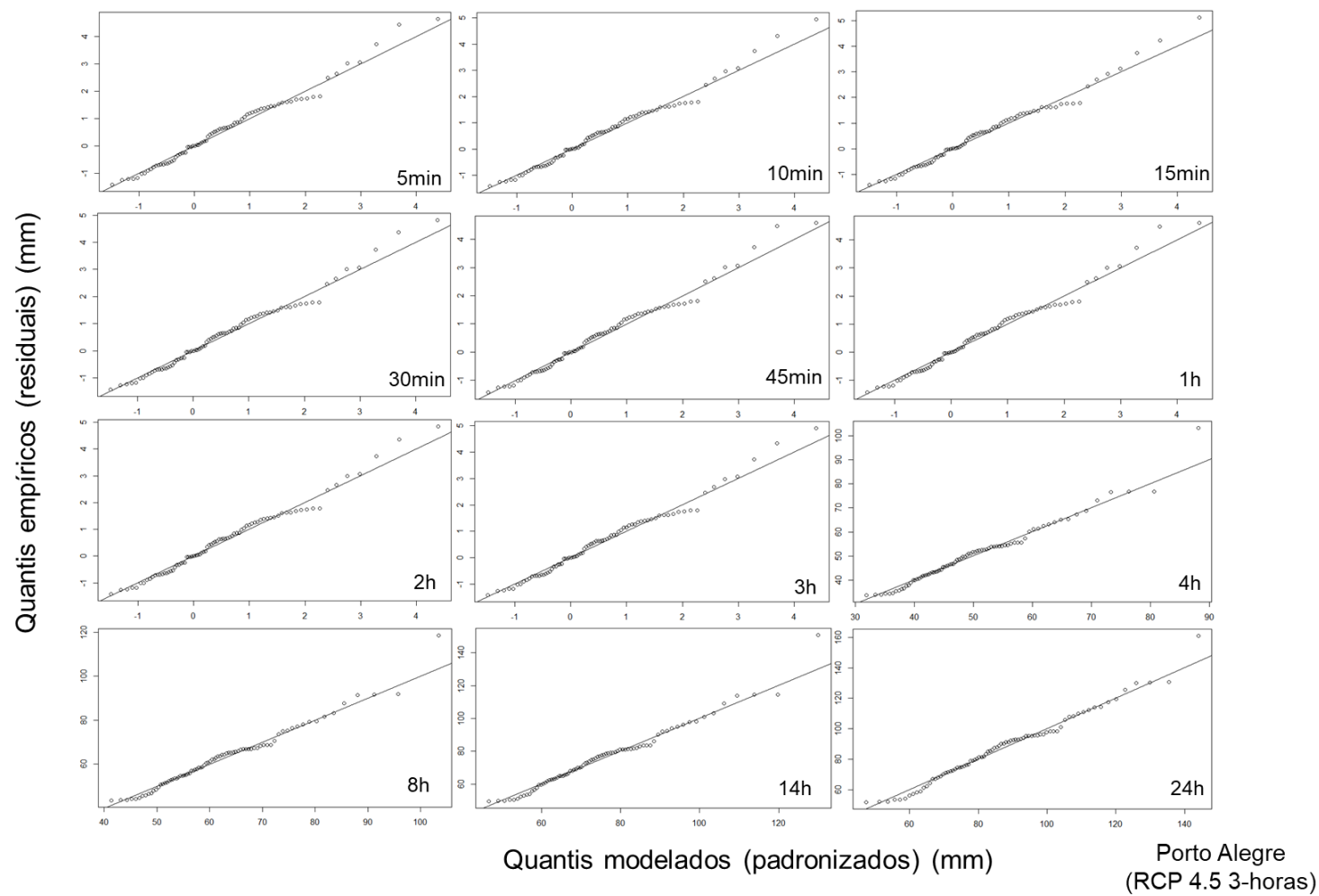
Duração	R_{QQ}^2
1h	0,9839
2h	0,9835
3 h	0,9829
4 h	0,9797
8 h	0,9823
14 h	0,9835
24 h	0,9814

Tabela A-47. Coeficiente de determinação do melhor modelo de GEV para séries futuras da estação São Paulo (RCP 8.5 3-horas).

Duração	R_{QQ}^2
1h	0,9525
2h	0,9516
3 h	0,9512
4 h	0,9689
8 h	0,9747
14 h	0,9763
24 h	0,9728

Tabela A-48. Coeficiente de determinação do melhor modelo de GEV para séries futuras da estação São Paulo (RCP 8.5 Diária).

Duração	R_{QQ}^2
1h	0,9856
2h	0,9854
3 h	0,9852
4 h	0,9838
8 h	0,9851
14 h	0,9856
24 h	0,9847

B) GRÁFICOS QUANTIL-QUANTIL PARA O MELHOR MODELO DE GEV**Figura A-11. Gráficos quantil-quantil ajustados às séries futuras para estação Porto Alegre (RCP 4.5 3-horas).**

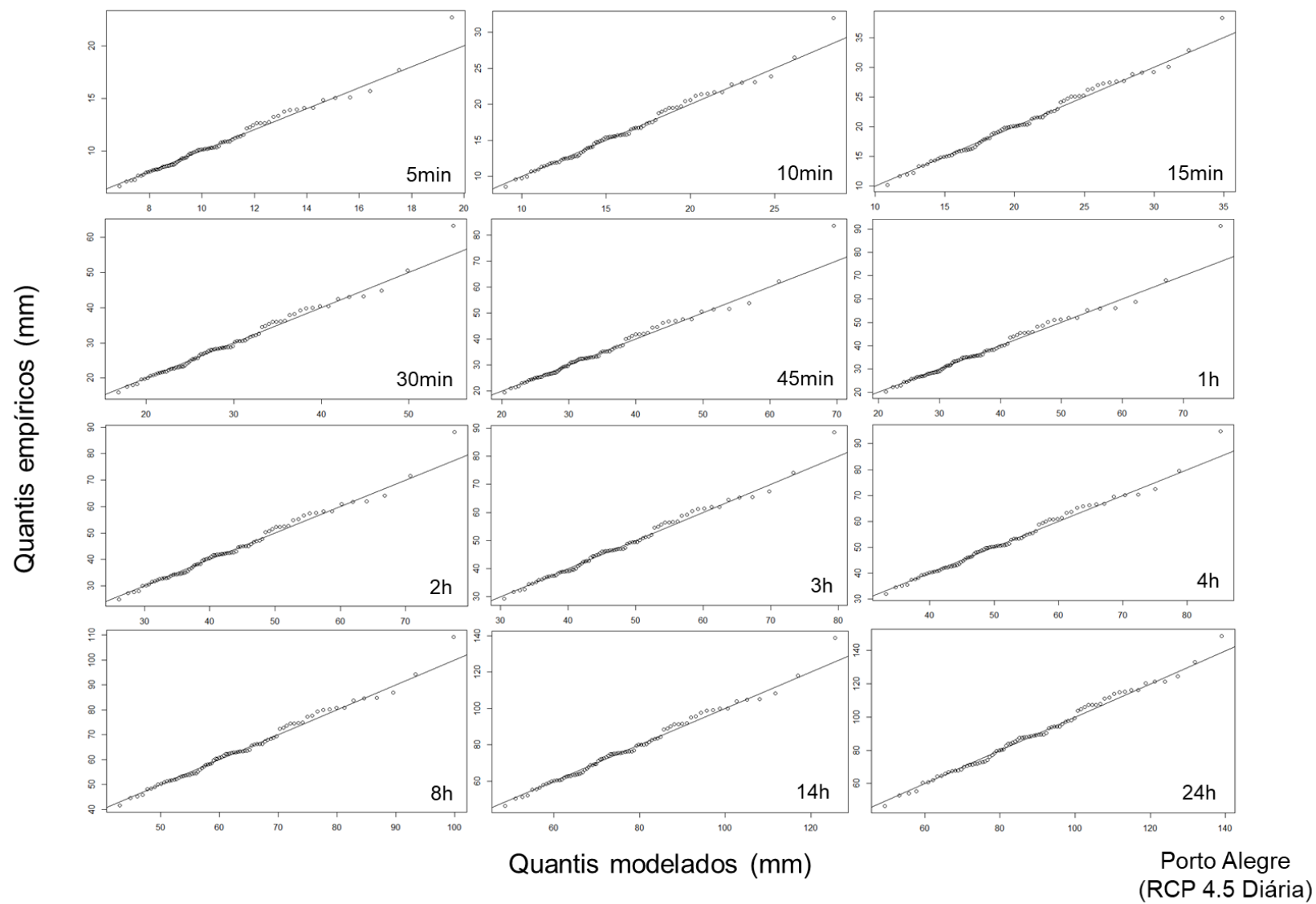


Figura A-12. Gráficos quantil-quantil ajustados às séries futuras para estação Porto Alegre (RCP 4.5 Diária).

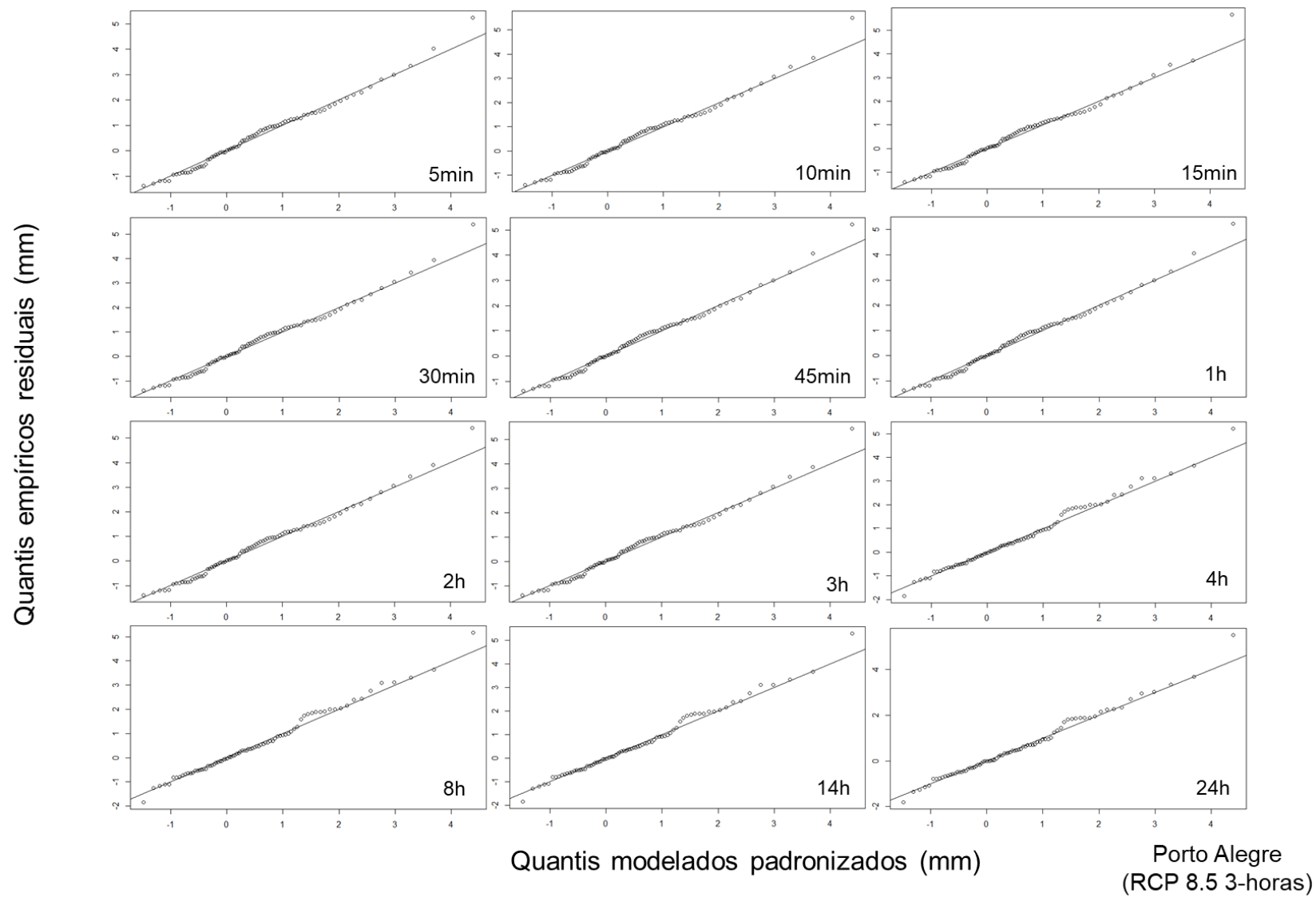


Figura A-13. Gráficos quantil-quantil ajustados às séries futuras para estação Porto Alegre (RCP 8.5 3-horas).

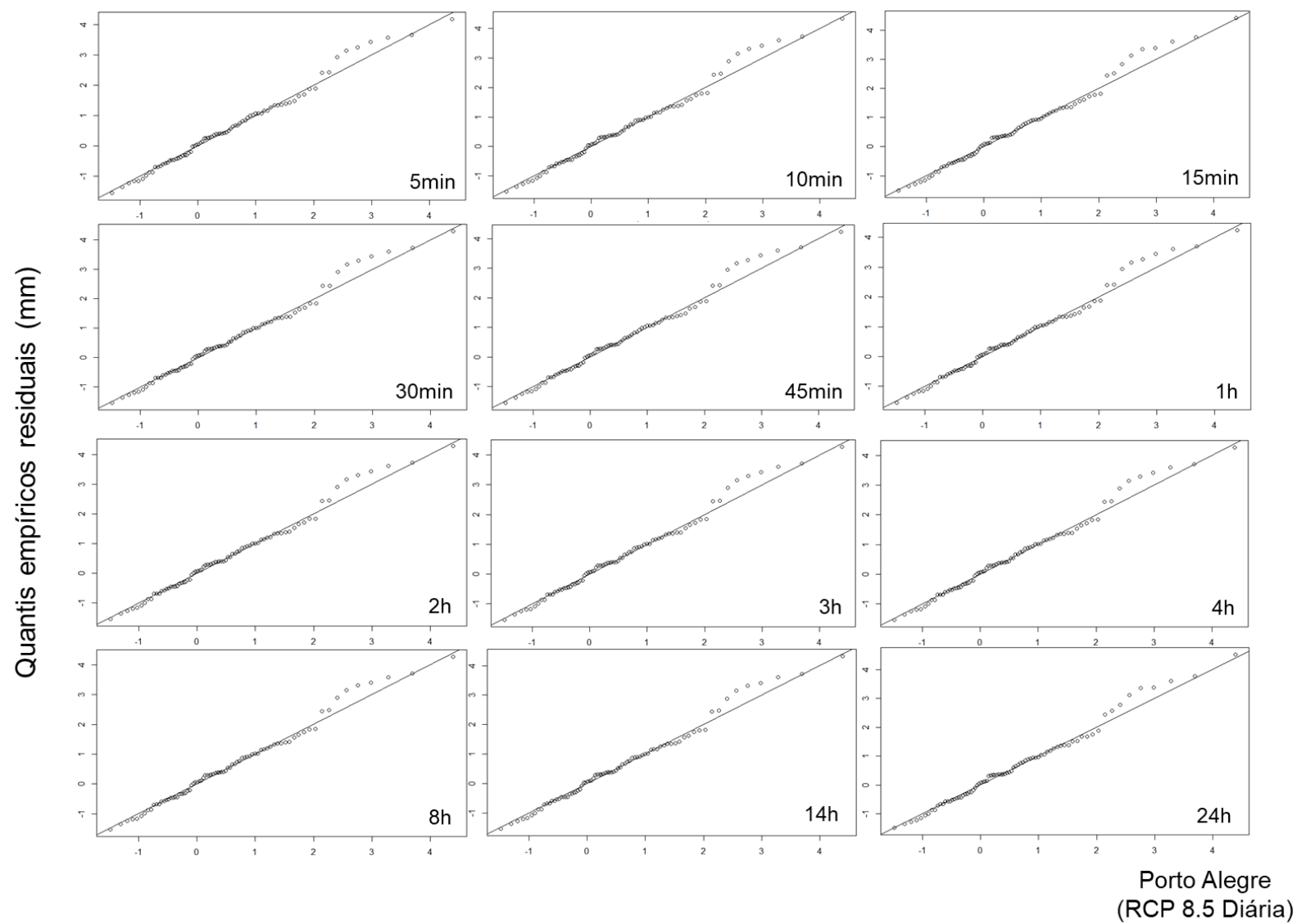


Figura A-14. Gráficos quantil-quantil ajustados às séries futuras para estação Porto Alegre (RCP 8.5 Diária).

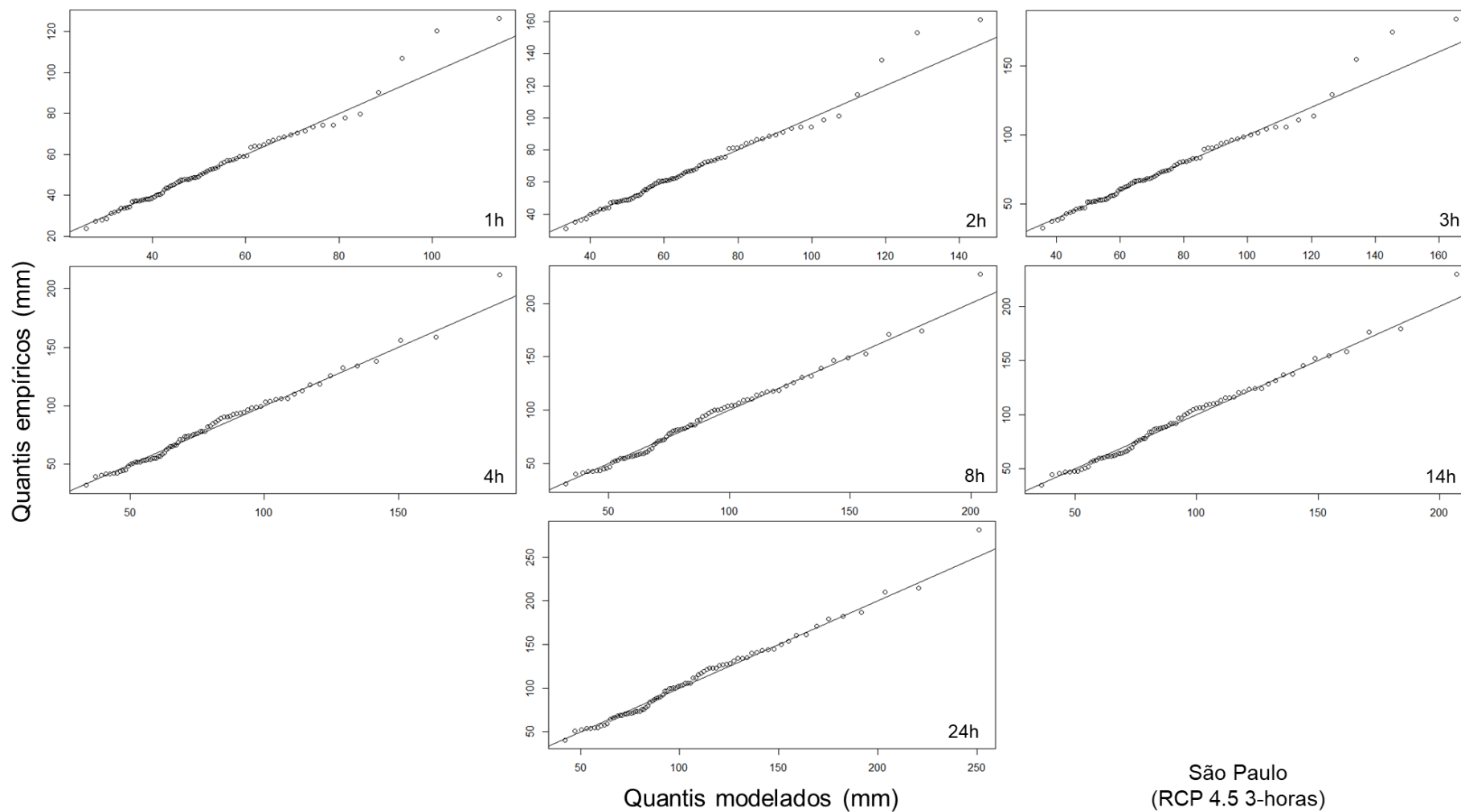


Figura A-15. Gráficos quantil-quantil ajustados às séries futuras para estação São Paulo (RCP 4.5 3-horas).

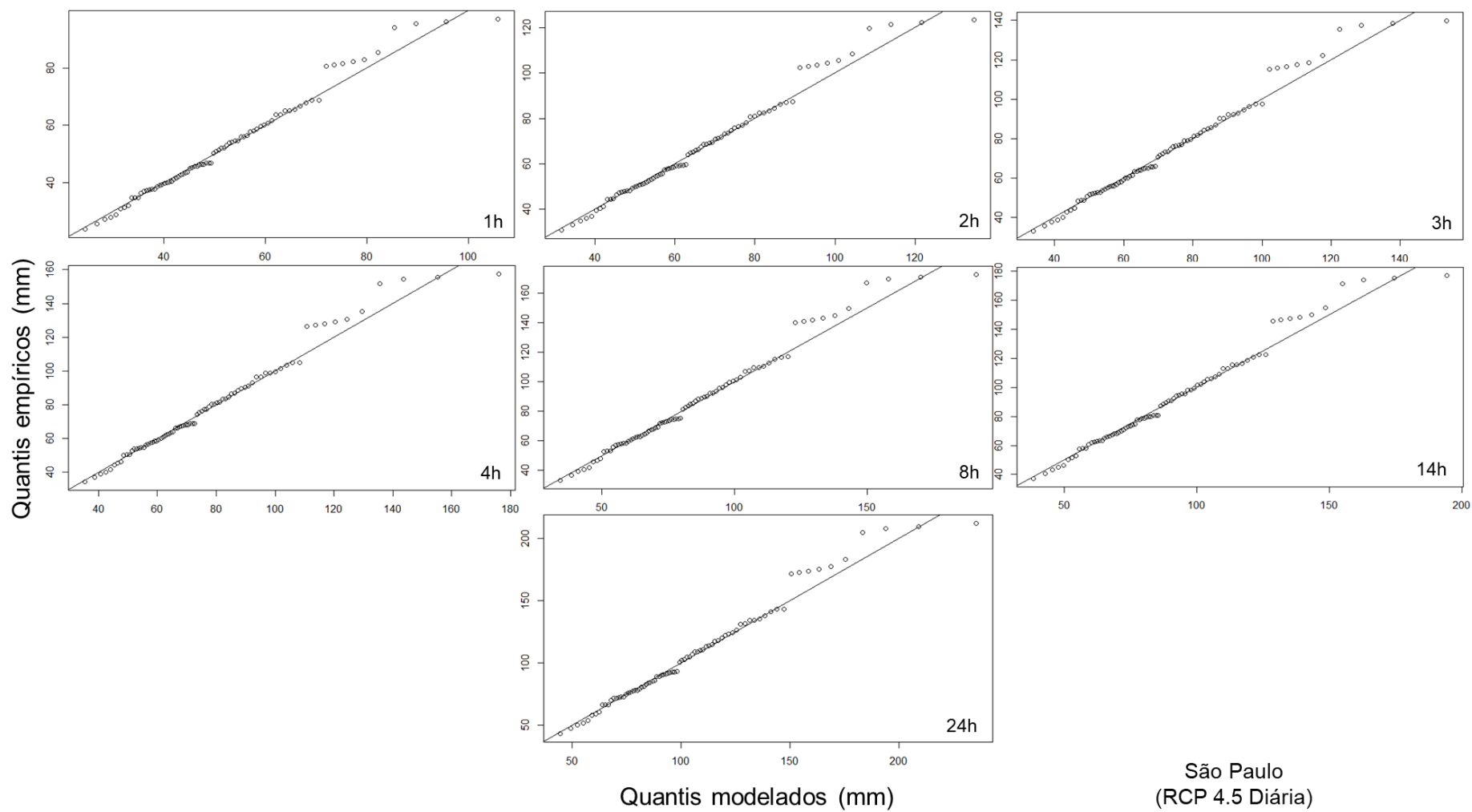


Figura A-16. Gráficos quantil-quantil ajustados às séries futuras para estação São Paulo (RCP 4.5 Diária).

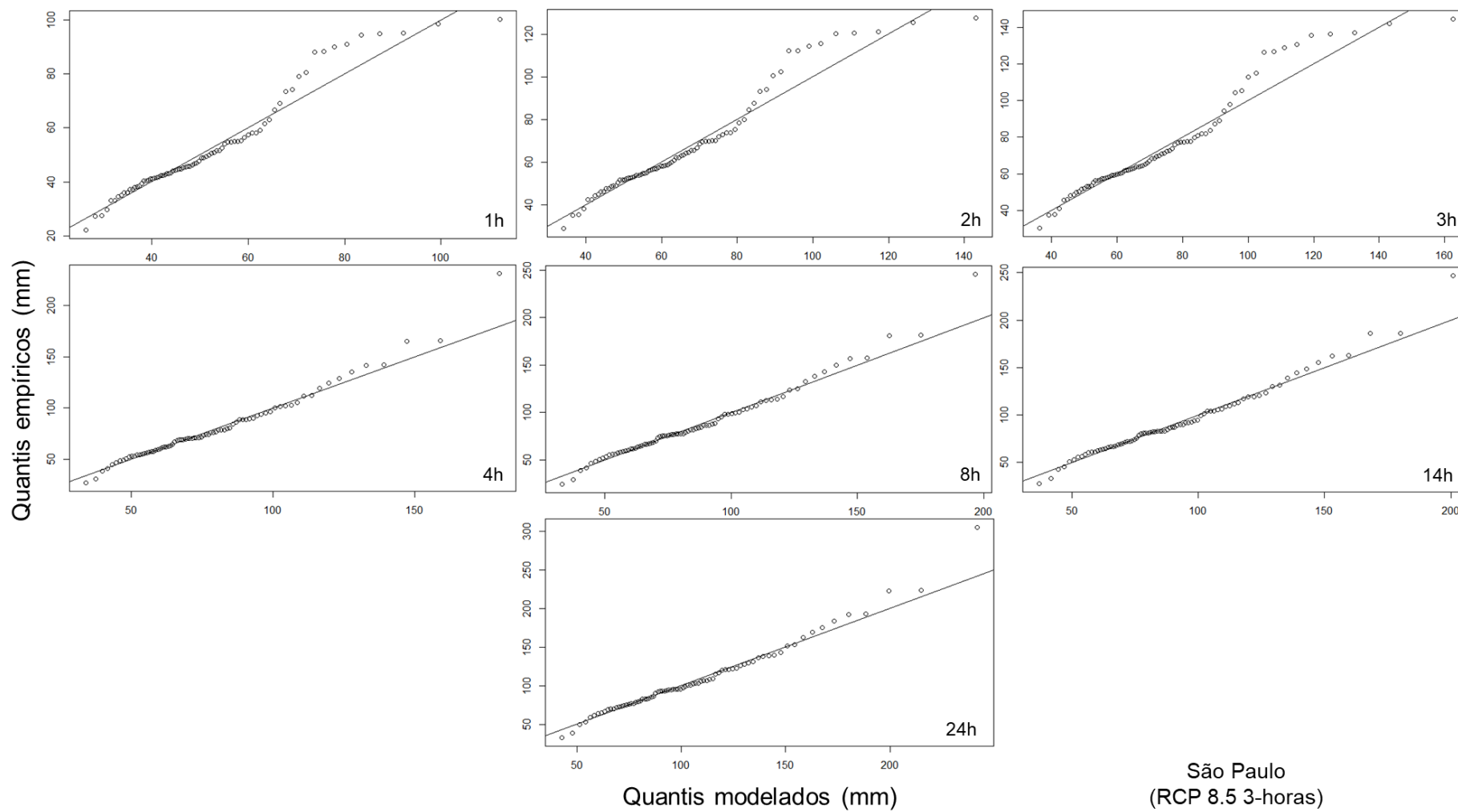


Figura A-17. Gráficos quantil-quantil ajustados às séries futuras para estação São Paulo (RCP 8.5 3-horas).

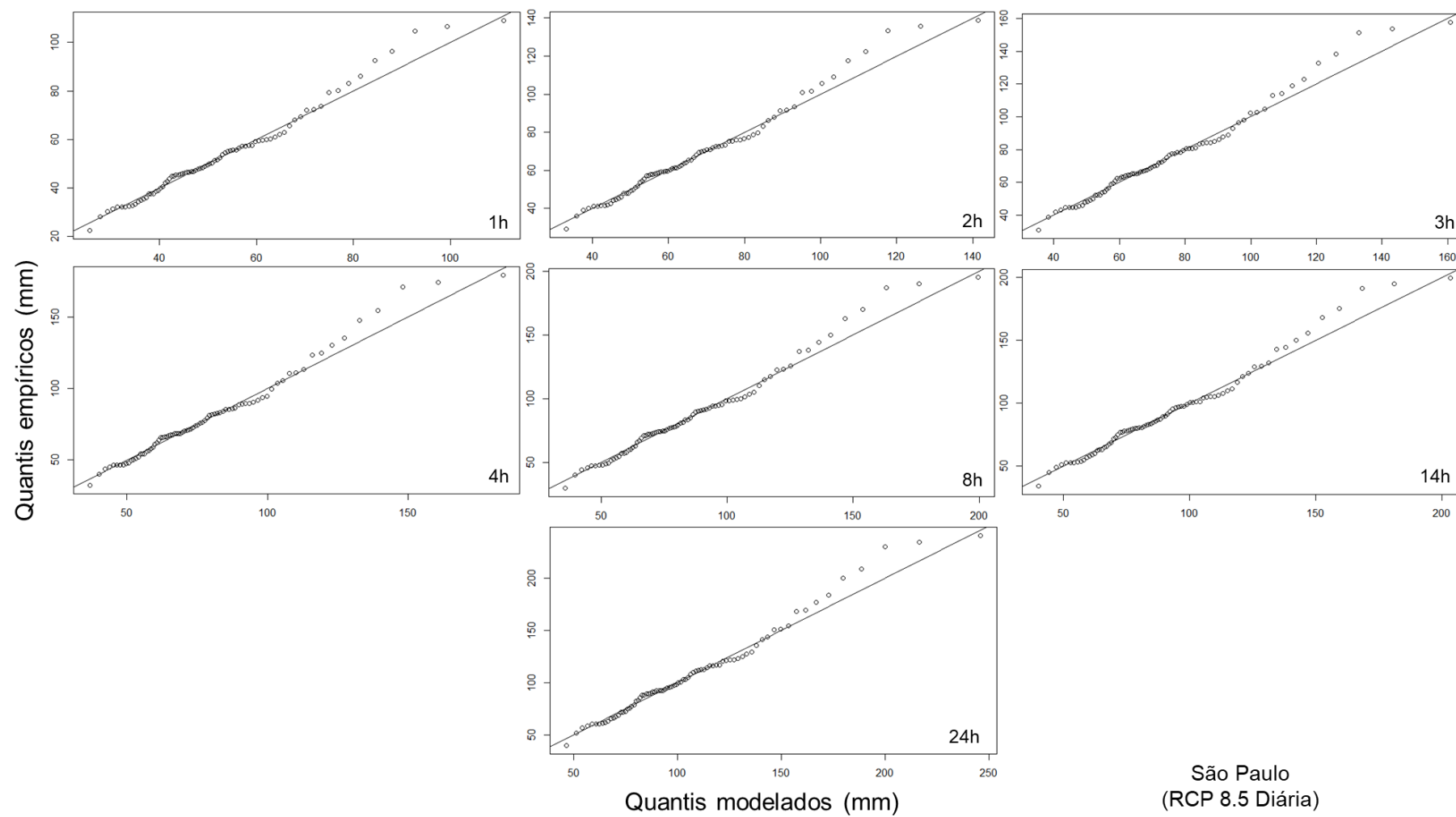


Figura A-18. Gráficos quantil-quantil ajustados às séries futuras para estação São Paulo (RCP 8.5 Diária).

C) PARÂMETROS DE AJUSTE DO MELHOR MODELO DE GEV

Tabela A-49. Parâmetros de ajuste do melhor modelo de GEV, para a estação Porto Alegre (RCP 4.5 3-horas).

Duração	Parâmetros		
	μ	σ	ξ
5 min	8,848+0,029*t	1,007+0,025*t	0,067
10 min	12,554+0,051*t	2,044+0,041*t	-0,036
15 min	16,554+0,068*t	2,957+0,049*t	-0,095
30 min	23,638+0,095*t	3,560+0,078*t	0,007
45 min	27,394+0,108*t	3,680+0,096*t	0,084
1 h	29,093+0,121*t	4,162+0,107*t	0,077
2 h	35,702+0,130*t	4,912+0,107*t	-0,001
3 h	40,551+0,128*t	4,982+0,103*t	-0,020
4 h	44,778	8,963	0,044
8 h	56,466	10,313	0,017
14 h	67,147	13,967	0,011
24 h	77,610	18,872	-0,104

Tabela A-50. Parâmetros de ajuste do melhor modelo de GEV, para a estação Porto Alegre (RCP 4.5 Diária).

Duração	Parâmetros		
	μ	σ	ξ
5 min	9,278	1,782	0,119
10 min	13,934	3,303	0,002
15 min	17,874	4,485	-0,068
30 min	25,393	6,009	0,053
45 min	29,305	6,654	0,139
1 h	31,341	7,500	0,134
2 h	37,929	8,219	0,042
3 h	42,457	8,137	0,015
4 h	45,958	8,671	0,014
8 h	57,958	9,895	-0,017
14 h	68,908	13,498	-0,020
24 h	79,652	18,285	-0,146

Tabela A-51. Parâmetros de ajuste do melhor modelo de GEV, para a estação Porto Alegre (RCP 8.5 3-horas).

Duração	Parâmetros		
	μ	σ	ξ
5 min	8,603+0,035*t	0,851+0,030*t	0,092
10 min	12,556+0,063*t	1,764+0,048*t	-0,007
15 min	15,976+0,083*t	2,570+0,060*t	-0,064
30 min	22,860+0,116*t	3,041+0,093*t	0,034
45 min	26,509+0,131*t	3,055+0,113*t	0,110
1 h	28,114+0,147*t	3,465+0,126*t	0,103
2 h	34,625+0,159*t	4,218+0,126*t	0,027
3 h	39,439+0,157*t	4,313+0,123*t	0,009
4 h	42,663+0,075*t	7,641	0,144
8 h	54,120+0,086*t	8,668	0,123
14 h	63,515+0,123*t	12,024	0,106
24 h	71,330+0,191*t	16,713	-0,022

Tabela A-52. Parâmetros de ajuste do melhor modelo de GEV, para a estação Porto Alegre (RCP 8.5 Diária).

Duração	Parâmetros		
	μ	σ	ξ
5 min	8,590+0,017*t	1,599	0,280
10 min	12,394+0,038*t	3,020	0,152
15 min	15,619+0,056*t	4,131	0,082
30 min	22,741+0,066*t	5,478	0,199
45 min	26,677+0,066*t	6,020	0,283
1 h	28,324+0,076*t	6,803	0,274
2 h	34,314+0,090*t	7,467	0,196
3 h	38,877+0,090*t	7,361	0,183
4 h	42,151+0,095*t	7,839	0,183
8 h	53,573+0,110*t	8,921	0,166
14 h	62,692+0,155*t	12,265	0,148
24 h	69,973+0,238*t	16,896	0,020

Tabela A-53. Parâmetros de ajuste do melhor modelo de GEV, para a estação São Paulo (RCP 4.5 3-horas).

Duração	Parâmetros		
	μ	σ	ξ
1 h	43,750	12,940	0,095
2 h	55,708	16,209	0,103
3 h	61,164	18,588	0,108
4 h	64,016	22,125	0,107
8 h	69,469	26,244	0,068
14 h	74,908	27,018	0,048
24 h	85,915	31,286	0,082

Tabela A-54. Parâmetros de ajuste do melhor modelo de GEV, para a estação São Paulo (RCP 4.5 Diária).

Duração	Parâmetros		
	μ	σ	ξ
1 h	44,140	13,428	0,020
2 h	56,192	16,845	0,027
3 h	61,684	19,267	0,037
4 h	64,561	20,896	0,086
8 h	70,032	24,911	0,046
14 h	75,521	25,562	0,026
24 h	86,638	29,642	0,060

Tabela A-55. Parâmetros de ajuste do melhor modelo de GEV, para a estação São Paulo (RCP 8.5 3-horas).

Duração	Parâmetros		
	μ	σ	ξ
1 h	43,905	12,640	0,092
2 h	55,903	15,817	0,100
3 h	61,384	18,182	0,104
4 h	65,274	22,144	0,073
8 h	70,784	26,221	0,040
14 h	76,274	26,950	0,024
24 h	87,567	31,285	0,052

Tabela A-56. Parâmetros de ajuste do melhor modelo de GEV, para a estação São Paulo (RCP 8.5 Diária).

Duração	Parâmetros		
	μ	σ	ξ
1 h	44,670	13,366	0,055
2 h	56,876	16,758	0,062
3 h	62,444	19,189	0,069
4 h	65,405	20,829	0,113
8 h	70,912	24,936	0,072
14 h	76,439	25,550	0,055
24 h	87,725	29,619	0,087

D) INTENSIDADE MÁXIMA DE PRECIPITAÇÃO OBTIDAS PARA OS MÉTODOS EQM E EQM_{NS}, CONSIDERANDO DIFERENTES CENÁRIOS E HORIZONTE DE PROJETO 2099

Tabela A-57. Intensidade máxima de precipitação para a estação Porto Alegre (RCP 4.5 3-horas), em mm/h, para os diferentes tempos de retorno.

Duração	EQM					
	2anos	5anos	10anos	25anos	50anos	100anos
5 min	133,31	158,11	179,89	213,36	242,75	276,20
10 min	104,99	124,52	141,68	168,04	191,19	217,53
15 min	87,29	103,53	117,79	139,70	158,95	180,85
30 min	59,23	70,25	79,93	94,79	107,86	122,71
45 min	45,57	54,05	61,50	72,94	82,99	94,42
1 h	37,37	44,33	50,44	59,82	68,06	77,44
2 h	22,48	26,66	30,34	35,98	40,94	46,58
3 h	16,47	19,53	22,22	26,36	29,99	34,12
4 h	13,15	15,60	17,74	21,05	23,95	27,24
8 h	7,57	8,98	10,22	12,12	13,79	15,69
14 h	4,82	5,72	6,51	7,72	8,78	9,99
24 h	3,11	3,69	4,20	4,98	5,67	6,45

Duração	EQM _{NS}					
	2anos	5anos	10anos	25anos	50anos	100anos
5 min	156,22	185,07	210,38	249,22	283,30	322,05
10 min	124,73	147,76	167,97	198,99	226,20	257,14
15 min	104,23	123,47	140,36	166,28	189,02	214,87
30 min	70,62	83,66	95,10	112,66	128,06	145,58
45 min	53,90	63,85	72,58	85,99	97,75	111,11
1 h	43,82	51,91	59,01	69,90	79,46	90,33
2 h	25,57	30,29	34,44	40,80	46,38	52,72
3 h	18,32	21,70	24,67	29,23	33,22	37,77
4 h	14,38	17,04	19,36	22,94	26,08	29,64
8 h	7,92	9,38	10,67	12,64	14,36	16,33
14 h	4,85	5,75	6,54	7,74	8,80	10,01
24 h	3,02	3,57	4,06	4,81	5,47	6,22

Tabela A-58. Intensidade máxima de precipitação para a estação Porto Alegre (RCP 4.5 Diária), em mm/h, para os diferentes tempos de retorno.

Duração	EQM					
	2anos	5anos	10anos	25anos	50anos	100anos
5 min	128,38	148,67	166,13	192,38	214,97	240,20
10 min	99,16	114,84	128,32	148,60	166,04	185,54
15 min	81,76	94,69	105,80	122,53	136,91	152,98
30 min	55,23	63,96	71,47	82,77	92,49	103,34
45 min	42,65	49,40	55,20	63,92	71,42	79,81
1 h	35,17	40,72	45,51	52,70	58,89	65,80
2 h	21,57	24,98	27,92	32,33	36,13	40,37
3 h	16,04	18,58	20,76	24,04	26,86	30,02
4 h	12,96	15,01	16,77	19,42	21,70	24,25
8 h	7,70	8,92	9,96	11,54	12,89	14,41
14 h	5,03	5,83	6,51	7,54	8,43	9,42
24 h	3,34	3,86	4,32	5,00	5,59	6,24
Duração	EQM _{NS}					
	2anos	5anos	10anos	25anos	50anos	100anos
5 min	128,49	148,77	166,21	192,44	215,01	240,21
10 min	99,20	114,86	128,33	148,58	166,00	185,46
15 min	81,78	94,69	105,79	122,48	136,84	152,89
30 min	55,23	63,95	71,45	82,72	92,42	103,25
45 min	42,65	49,38	55,17	63,88	71,37	79,73
1 h	35,16	40,71	45,49	52,66	58,84	65,74
2 h	21,57	24,98	27,91	32,31	36,10	40,33
3 h	16,04	18,57	20,75	24,03	26,84	29,99
4 h	12,96	15,01	16,77	19,41	21,69	24,23
8 h	7,70	8,92	9,96	11,53	12,89	14,40
14 h	5,04	5,83	6,52	7,54	8,43	9,42
24 h	3,34	3,87	4,32	5,00	5,59	6,24

Tabela A-59. Intensidade máxima de precipitação para a estação Porto Alegre (RCP 8.5 3-horas), em mm/h, para os diferentes tempos de retorno.

Duração	EQM					
	2anos	5anos	10anos	25anos	50anos	100anos
5 min	133,79	159,99	183,17	219,04	250,77	287,11
10 min	105,92	126,66	145,01	173,41	198,53	227,29
15 min	88,29	105,59	120,88	144,56	165,50	189,48
30 min	60,09	71,86	82,27	98,38	112,63	128,95
45 min	46,25	55,31	63,33	75,73	86,70	99,26
1 h	37,93	45,35	51,92	62,09	71,09	81,39
2 h	22,76	27,22	31,17	37,27	42,67	48,85
3 h	16,64	19,90	22,78	27,25	31,19	35,71
4 h	13,27	15,86	18,16	21,72	24,86	28,47
8 h	7,61	9,10	10,41	12,45	14,26	16,32
14 h	4,82	5,77	6,60	7,90	9,04	10,35
24 h	3,10	3,71	4,24	5,08	5,81	6,65
Duração	EQM _{NS}					
	2anos	5anos	10anos	25anos	50anos	100anos
5 min	161,40	193,53	222,02	266,23	305,43	350,40
10 min	128,63	154,25	176,96	212,19	243,43	279,27
15 min	107,37	128,75	147,70	177,11	203,18	233,10
30 min	72,62	87,08	99,90	119,79	137,43	157,67
45 min	55,39	66,42	76,20	91,37	104,82	120,25
1 h	45,01	53,97	61,92	74,25	85,18	97,72
2 h	26,26	31,48	36,12	43,31	49,69	57,00
3 h	18,81	22,55	25,87	31,02	35,59	40,83
4 h	14,76	17,70	20,31	24,35	27,94	32,05
8 h	8,13	9,75	11,19	13,42	15,39	17,66
14 h	4,99	5,98	6,86	8,22	9,43	10,82
24 h	3,10	3,72	4,26	5,11	5,87	6,73

Tabela A-60. Intensidade máxima de precipitação para a estação Porto Alegre (RCP 8.5 Diária), em mm/h, para os diferentes tempos de retorno.

Duração	EQM					
	2anos	5anos	10anos	25anos	50anos	100anos
5 min	126,16	150,16	171,30	203,88	232,59	265,34
10 min	98,25	116,94	133,40	158,78	181,14	206,64
15 min	81,36	96,84	110,48	131,49	150,01	171,13
30 min	55,27	65,78	75,05	89,32	101,90	116,25
45 min	42,77	50,90	58,07	69,12	78,85	89,95
1 h	35,29	42,00	47,92	57,03	65,06	74,22
2 h	21,66	25,78	29,41	35,01	39,94	45,56
3 h	16,10	19,16	21,86	26,02	29,68	33,86
4 h	13,00	15,47	17,65	21,01	23,97	27,34
8 h	7,71	9,18	10,47	12,46	14,21	16,21
14 h	5,03	5,99	6,83	8,13	9,28	10,58
24 h	3,33	3,96	4,52	5,38	6,14	7,00
Duração	EQM _{NS}					
	2anos	5anos	10anos	25anos	50anos	100anos
5 min	131,65	156,95	179,28	213,75	244,16	278,90
10 min	103,12	122,94	140,43	167,43	191,25	218,46
15 min	85,65	102,11	116,64	139,06	158,85	181,45
30 min	58,38	69,60	79,50	94,78	108,27	123,67
45 min	45,21	53,90	61,57	73,40	83,84	95,77
1 h	37,31	44,48	50,81	60,57	69,19	79,03
2 h	22,88	27,27	31,15	37,14	42,43	48,46
3 h	16,98	20,25	23,13	27,57	31,49	35,97
4 h	13,70	16,33	18,65	22,24	25,40	29,02
8 h	8,10	9,65	11,03	13,15	15,02	17,15
14 h	5,27	6,28	7,18	8,56	9,77	11,16
24 h	3,48	4,14	4,73	5,64	6,45	7,36

Tabela A-61. Intensidade máxima de precipitação para a estação São Paulo (RCP 4.5 3-horas), em mm/h, para os diferentes tempos de retorno.

Duração	EQM					
	2anos	5anos	10anos	25anos	50anos	100anos
1 h	42,14	52,56	62,11	77,47	91,56	108,22
2 h	26,28	32,77	38,73	48,31	57,09	67,48
3 h	19,32	24,10	28,48	35,52	41,99	49,62
4 h	15,38	19,18	22,67	28,27	33,42	39,50
8 h	8,66	10,80	12,76	15,92	18,82	22,24
14 h	5,36	6,68	7,90	9,85	11,64	13,76
24 h	3,35	4,18	4,94	6,16	7,27	8,60
Duração	EQM _{NS}					
	2anos	5anos	10anos	25anos	50anos	100anos
1 h	50,72	62,99	74,20	92,15	108,56	127,89
2 h	32,00	39,74	46,81	58,14	68,49	80,68
3 h	23,72	29,45	34,70	43,09	50,76	59,80
4 h	18,99	23,58	27,78	34,50	40,64	47,88
8 h	10,86	13,48	15,88	19,73	23,24	27,38
14 h	6,81	8,45	9,96	12,36	14,57	17,16
24 h	4,31	5,35	6,30	7,83	9,22	10,86

Tabela A-62. Intensidade máxima de precipitação para a estação São Paulo (RCP 4.5 Diária), em mm/h, para os diferentes tempos de retorno.

Duração	EQM					
	2anos	5anos	10anos	25anos	50anos	100anos
1 h	42,31	51,93	60,63	74,40	86,87	101,42
2 h	26,33	32,31	37,72	46,30	54,05	63,11
3 h	19,34	23,74	27,71	34,01	39,71	46,36
4 h	15,38	18,88	22,04	27,05	31,58	36,88
8 h	8,65	10,62	12,39	15,21	17,76	20,73
14 h	5,35	6,56	7,66	9,40	10,98	12,82
24 h	3,34	4,10	4,78	5,87	6,85	8,00

Duração	EQM _{NS}					
	2anos	5anos	10anos	25anos	50anos	100anos
1 h	51,24	62,48	72,59	88,51	102,83	119,47
2 h	32,35	39,44	45,83	55,88	64,92	75,43
3 h	23,98	29,24	33,98	41,43	48,13	55,92
4 h	19,20	23,42	27,21	33,17	38,54	44,78
8 h	10,98	13,39	15,55	18,97	22,04	25,60
14 h	6,88	8,39	9,75	11,89	13,81	16,05
24 h	4,35	5,31	6,17	7,52	8,74	10,15

Tabela A-63. Intensidade máxima de precipitação para a estação São Paulo (RCP 8.5 3-horas), em mm/h, para os diferentes tempos de retorno.

Duração	EQM					
	2anos	5anos	10anos	25anos	50anos	100anos
1 h	42,85	52,85	61,93	76,38	89,51	104,90
2 h	26,85	33,11	38,81	47,86	56,08	65,73
3 h	19,76	24,37	28,56	35,22	41,28	48,37
4 h	15,72	19,39	22,73	28,03	32,84	38,49
8 h	8,83	10,89	12,76	15,74	18,44	21,61
14 h	5,44	6,71	7,87	9,70	11,37	13,32
24 h	3,39	4,18	4,89	6,04	7,07	8,29

Duração	EQM _{NS}					
	2anos	5anos	10anos	25anos	50anos	100anos
1 h	51,82	63,54	74,14	90,91	106,07	123,77
2 h	32,74	40,15	46,85	57,45	67,03	78,21
3 h	24,26	29,75	34,72	42,57	49,67	57,96
4 h	19,42	23,81	27,78	34,06	39,75	46,38
8 h	11,07	13,58	15,84	19,42	22,66	26,44
14 h	6,92	8,48	9,90	12,14	14,16	16,53
24 h	4,36	5,35	6,24	7,66	8,93	10,42

Tabela A-64. Intensidade máxima de precipitação para a estação São Paulo (RCP 8.5 Diária), em mm/h, para os diferentes tempos de retorno.

Duração	EQM					
	2anos	5anos	10anos	25anos	50anos	100anos
1 h	42,78	52,91	62,14	76,86	90,27	106,02
2 h	26,68	33,00	38,76	47,94	56,31	66,13
3 h	19,61	24,26	28,49	35,24	41,39	48,61
4 h	15,60	19,30	22,67	28,03	32,92	38,67
8 h	8,77	10,84	12,74	15,75	18,50	21,73
14 h	5,41	6,70	7,86	9,73	11,42	13,42
24 h	3,38	4,17	4,90	6,06	7,12	8,36
Duração	EQM _{NS}					
	2anos	5anos	10anos	25anos	50anos	100anos
1 h	51,60	63,50	74,29	91,42	106,96	125,15
2 h	32,45	39,93	46,72	57,49	67,26	78,70
3 h	24,03	29,57	34,60	42,58	49,82	58,29
4 h	19,24	23,68	27,70	34,09	39,89	46,66
8 h	11,01	13,55	15,85	19,51	22,83	26,71
14 h	6,91	8,51	9,95	12,25	14,33	16,77
24 h	4,38	5,39	6,31	7,77	9,09	10,63