

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Centro de Desenvolvimento Tecnológico
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos



Tese

**Impacto das mudanças climáticas sobre as vazões em bacias
hidrográficas do Pampa brasileiro**

Alice Alonzo Steinmetz

Pelotas, 2020

Alice Alonzo Steinmetz

**Impacto das mudanças climáticas sobre as vazões em bacias hidrográficas
do Pampa brasileiro**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Doutora em Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Samuel Beskow

Pelotas, 2020

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

S823i Steinmetz, Alice Alonzo

Impacto das mudanças climáticas sobre as vazões em
bacias hidrográficas do pampa brasileiro / Alice Alonzo
Steinmetz ; Samuel Beskow, orientador. — Pelotas, 2020.
163 f. : il.

Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em
Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico,
Universidade Federal de Pelotas, 2020.

1. Modelagem hidrológica. 2. SWAT. 3. Modelos
climáticos globais. 4. Modelo climático regional Eta. 5.
Indicadores hidrológicos. I. Beskow, Samuel, orient. II.
Título.

CDD : 627

Elaborada por Maria Inez Figueiredo Figas Machado CRB: 10/1612

Alice Alonzo Steinmetz

**Impacto das mudanças climáticas sobre as vazões em bacias
hidrográficas do Pampa brasileiro**

Tese aprovada, como requisito parcial, para obtenção do grau de Doutora em Recursos Hídricos, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas.

Data da Defesa: 17/04/2020

Banca Examinadora:



Prof. Dr. Samuel Beskow (Presidente)

Doutor em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Lavras.



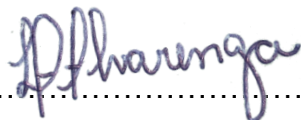
Prof^a Dr^a Danielle de Almeida Bressiani

Doutora em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela Universidade de São Paulo.



Prof. Dr. André Becker Nunes

Doutor em Meteorologia pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.



Prof^a. Dr^a Livia Alves Alvarenga

Doutora em Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Lavras.

Aos meus pais
Hugo Steinmetz & Maria Angélica Alonzo
DEDICO.

“Diante do desconhecido, procure conhecer; nas dificuldades, ache soluções. As dificuldades são oportunidades para recuperar-se. ”
(Vera Lúcia Marinzeck de Carvalho)

Resumo

STEINMETZ, Alice Alonzo. **Impacto das mudanças climáticas sobre as vazões em bacias hidrográficas do Pampa brasileiro**. 2020. 163f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2020.

As mudanças climáticas se tornaram uma preocupação crescente em todo o mundo. Essas mudanças impactam na gestão dos recursos hídricos uma vez que poderão alterar as condições hidrológicas de forma incerta no futuro. Como consequência, se espera a alteração dos padrões espaciais e temporais de precipitação e temperatura devido às mudanças nos regimes. Portanto, podem causar impactos significativos no clima de cada região, o que pode afetar a agricultura, desenvolvimento urbano e industrial, disponibilidade hídrica, além de aumentar as condições de ocorrência de eventos extremos, como inundações e secas. A partir disso, o presente estudo tem como objetivo avaliar o impacto das mudanças climáticas sobre as condições hidrológicas de três sub-bacias pertencentes a bacia hidrográfica Mirim-São Gonçalo (BHMSG). A BHMSG é caracterizada pelo bioma Pampa e é considerada uma área de importância ambiental, social e econômica para a região sul do Brasil. Essa bacia é extremamente sensível às variações do regime hídrico, sendo importantes estudos que considerem a simulação dos impactos associados às mudanças climáticas na região. O *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) foi calibrado e validado para cada sub-bacia, considerando os dados meteorológicos e hidrológicos observados e, posteriormente, esse modelo foi forçado com dados meteorológicos diários simulados para o passado e projetados para o futuro. Essas projeções foram baseadas nos Caminhos Representativos de Concentração (RCPs) 4.5 e 8.5 de quatro modelos climáticos globais pelas projeções de *downscaling* do modelo ETA: *Brazilian Earth System Model* (BESM), *Canadian Earth System Model* (CANESM2), *Hadley Centre Global Environmental Model* (HADGEM2) e *Interdisciplinary Research on Climate* (MIROC5). Em geral, o desempenho do SWAT foi satisfatório na calibração e validação de todas as sub-bacias, bem como na representação dos indicadores hidrológicos analisados neste estudo. Com relação às mudanças climáticas, os resultados indicam aumento das vazões médias anuais, máximas e mínimas, e as maiores variações foram obtidas para as projeções climáticas baseadas no RCP 4.5. Para a RCP 8.5, a maioria dos indicadores hidrológicos apresentou um aumento menos acentuado no final do século XXI. Os resultados apresentados projetam os efeitos das mudanças climáticas na disponibilidade hídrica, onde é esperado um aumento de chuvas em períodos futuros para a região, levando a um aumento nas vazões dos rios, gerando erosão hídrica e uma maior frequência de eventos extremos. Por outro lado, esses resultados podem ser positivos para a agricultura, que depende muito da disponibilidade futura de água. Tais resultados podem ajudar os tomadores de decisão a estruturar melhor o gerenciamento dos recursos hídricos, considerando essas mudanças climáticas e hidrológicas esperadas.

Palavras-chave: modelagem hidrológica, SWAT, modelos climáticos globais, modelo climático regional Eta, indicadores hidrológicos, Bacia hidrológica Mirim São-Gonçalo

Abstract

STEINMETZ, Alice Alonzo. **Impact of climate change on streamflows in basins of the Brazilian Pampa**. 2020. 163p. Dissertation (Doctorate of Water Resources) – Postgraduate Program in Water Resources, Center for Technological Development, Federal University of Pelotas, Pelotas, 2020.

Climate changes have become a growing concern worldwide. These changes have an impact on the management of water resources as they may change hydrological conditions in an uncertain manner in the future. As a consequence, changes in rainfall and temperature spatial and temporal patterns are expected due to changes regimes. Therefore, they can cause significant impacts on the climate of each region, which may affect agriculture, urban and industrial development, and water availability, and increase the frequency of occurrence of extreme events, such as floods and droughts. In this context, the present study aims to assess the impact of climate changes on the hydrological conditions of three subwatersheds of the Mirim-São Gonçalo basin (MSGB). MSGB is characterized by the Pampa biome and is considered an area of environmental, social and economic importance for the southern Brazil. This basin is extremely sensitive to variations in the water regime, thus, studies that consider the simulation of the impacts associated with climate changes in the region are important. The Soil and Water Assessment Tool (SWAT) was calibrated and validated for each subwatershed considering observed meteorological and hydrological data and, later, such a model was forced with daily meteorological data simulated for the past and projected for the future. These projections were based on the Representative Concentration Paths (RCPs) 4.5 and 8.5 of four global climate models by the downscaling projections of the ETA model: Brazilian Earth System Model (BESM), Canadian Earth System Model (CANESM2), Hadley Centre Global Environmental Model (HADGEM2), and Interdisciplinary Research on Climate (MIROC5). In general, the SWAT performance was satisfactory in the calibration and validation for all sub-watersheds, as well as in the representation of the hydrological indicators analyzed in this study. With respect to climate changes, the results indicate an increase in annual average, maximum and minimum streamflows, and that the greatest variations were obtained for the climate projections based on RCP 4.5. For RCP 8.5, most of the hydrological indicators presented an increase that was less accentuated at the end of the 21st century. The results project the effects of climate changes on water availability, where an increase in rainfall in future periods is expected for the region, leading to an increase in streamflows, generating water erosion and a higher frequency of extreme events. On the other hand, these results can be positive for agriculture, which depends heavily on the future water availability. Such results can help decision makers to better structure the management of water resources considering these expected climate and hydrological changes.

Key-words: hydrological modeling, SWAT, global climate models, Eta regional climate model, hydrological indicators, Mirim-São Gonçalo hydrological basin

Lista de Figuras

Figura 1 – Localização geográfica (em escala de continente, país e estado) da bacia hidrográfica Mirim-São Gonçalo do lado brasileiro.....	40
Figura 2 – Delimitação e localização na bacia hidrográfica Mirim-São Gonçalo (lado brasileiro) das bacias hidrográficas do arroio Pelotas (BHAP), do arroio Fragata (BHAF) e do rio Piratini (BHRP), bem como suas seções de controle.	42
Figura 3 – Localização das estações meteorológicas, pluviométricas e fluviométricas empregadas.....	45
Figura 4 – Modelo digital de elevação utilizado no processamento das bases de dados espaciais contemplando a área de drenagem de cada uma das sub-bacias analisadas.	46
Figura 5 – Mapa de declividade gerado a partir do processamento no ArcSWAT para as bacias em estudo utilizando as classes de declividade propostas por EMBRAPA (2014).	47
Figura 6 – Mapa de usos do solo empregado no processamento das bases de dados espaciais contemplando a área de drenagem de cada uma das sub-bacias analisadas.	48
Figura 7 – Mapa de solos utilizado no processamento das bases de dados espaciais das bacias hidrográficas no SWAT extraída do Mapa de Solos da Região do Conselho Regional de Desenvolvimento da Região Sul (COREDE-SUL) (Cunha, Silveira e Severo, 2006).	49
Figura 8 – Pontos da grade dos modelos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-HADGEM2 e ETA-MIROC5 sobre a área de estudo, compreendida pela bacia hidrográfica do arroio Fragata (BHAF), bacia hidrográfica do arroio Pelotas (BHAP) e pela bacia hidrográfica do rio Piratini (BHRP).	54
Figura 9 – Delimitação das bacias hidrográficas do arroio Fragata (BHAF), do arroio Pelotas (BHAP) e do rio Piratini (BHRP), com representação das suas localizações na bacia hidrográfica Mirim-São Gonçalo (BHMSG) e delimitação das respectivas sub-bacias de acordo com as seções de controle.....	63
Figura 10 – Hidrogramas diários observados e estimados para a bacia hidrográfica do arroio Fragata para os períodos de calibração (1 de janeiro de 1995 a 31 de dezembro de 2000) (a) e validação (1 de janeiro de 2001 a 31 de dezembro de 2005) (b).....	65

Figura 11 – Hidrogramas diários observados e estimados para a bacia hidrográfica do arroio Pelotas para os períodos de calibração (1 de janeiro de 1995 a 31 de dezembro de 2000) (a) e validação (1 de janeiro de 2001 a 31 de dezembro de 2005) (b).....	66
Figura 12 – Hidrogramas diários observados e estimados para a bacia hidrográfica do rio Piratini para os períodos de calibração (1 de janeiro de 2008 a 31 de dezembro de 2012) (a) e validação (1 de janeiro de 2013 a 31 de dezembro de 2016) (b).....	67
Figura 13 – Hidrogramas mensais observados e estimados para a bacia hidrográfica do arroio Fragata para os períodos de calibração (1 de janeiro de 1995 a 31 de dezembro de 2000) (a) e validação (1 de janeiro de 2001 a 31 de dezembro de 2005) (b).....	68
Figura 14 – Hidrogramas mensais observados e estimados para a bacia hidrográfica do arroio Pelotas para os períodos de calibração (1 de janeiro de 1995 a 31 de dezembro de 2000) (a) e validação (1 de janeiro de 2001 a 31 de dezembro de 2005) (b).....	69
Figura 15 – Hidrogramas mensais observados e estimados para a bacia hidrográfica do rio Piratini para os períodos de calibração (1 de janeiro de 2008 a 31 de dezembro de 2012) (a) e validação (1 de janeiro de 2013 a 31 de dezembro de 2016) (b).....	70
Figura 16 – Vazões médias diárias acumuladas para os períodos de calibração (1995 - 2000) e validação (2001 - 2005) para bacia hidrográfica do arroio Fragata.	75
Figura 17 – Vazões médias diárias acumuladas para os períodos de calibração (1995 - 2000) e validação (2001 - 2005) para bacia hidrográfica do arroio Pelotas.	76
Figura 18 – Vazões médias diárias acumuladas para os períodos de calibração (2008 - 2012) e validação (2013 - 2016) para bacia hidrográfica do rio Piratini.	77
Figura 19 – Vazões mínimas (a), médias (b) e máximas (c) diárias observadas para a bacia hidrográfica do arroio Fragata, assim como as estimadas com o SWAT..	79
Figura 20 – Vazões mínimas (a), médias (b) e máximas (c) diárias observadas para a bacia hidrográfica do arroio Pelotas, assim como as estimadas com o SWAT. .	80
Figura 21 – Vazões mínimas (a), médias (b) e máximas (c) diárias observadas para a bacia hidrográfica do rio Piratini, assim como as estimadas com o SWAT.	81

Figura 22 – Curvas de permanência de vazões médias diárias observadas e vazões médias diárias estimadas para as bacias hidrográficas do arroio Fragata (a), do arroio Pelotas (b) e do rio Piratini (c).	84
Figura 23 - Vazões médias mensais observadas, vazões médias mensais simuladas pelo modelo SWAT forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HADGEM2, média das vazões simuladas (ensemble mean), precipitação média mensal considerando os dados observados da estação de monitoramento de chuva “Ponte Cordeiro de Farias”, precipitação média simulada pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HADGEM2 (nas mesmas cores) para o período de 1965 a 2005 considerando as bacias hidrográficas do arroio Fragata (BHAF) (a) e do arroio Pelotas (BHAP) (b).	91
Figura 24 – Curvas de permanência de vazões médias mensais observadas e simuladas pelo modelo hidrológico SWAT forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HADGEM2 para as bacias hidrográficas do arroio Fragata (a) e do arroio Pelotas (b), considerando o período de clima passado (1965 a 2005).	96
Figura 25 - Vazões médias mensais extraídas dos hidrogramas mensais simulados pelo SWAT forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HADGEM2 para o clima passado (1961 a 2005) e para as projeções futuras de 2006 a 2040, 2041 a 2070 2071 a 2099 e Ensemble Mean, considerando os RCPs 4.5 e 8.5 para todos os cenários na bacia hidrográfica do arroio Fragata (BHAF).	100
Figura 26 - Vazões médias mensais extraídas dos hidrogramas mensais simulados pelo SWAT forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HADGEM2 para o clima passado (1961 a 2005) e para as projeções futuras de 2006 a 2040, 2041 a 2070, 2071 a 2099 e Ensemble Mean, considerando os RCPs 4.5 e 8.5 para todos os cenários na bacia hidrográfica do arroio Pelotas (BHAP).	101
Figura 27 - Vazões médias mensais extraídas dos hidrogramas mensais simulados pelo SWAT forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HADGEM2 para o clima passado (1961 a 2005) e para as projeções futuras de 2006 a 2040, 2041 a 2070, 2071 a 2099 e Ensemble Mean,	

considerando os RCPs 4.5 e 8.5 para todos os cenários na bacia hidrográfica do rio Piratini (BHRP).	102
Figura 28 - Variação entre as vazões médias mensais extraídas dos hidrogramas mensais simulados pelo SWAT forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HADGEM2 para os RCPs 4.5 e 8.5, e as vazões extraídas dos hidrogramas mensais simulados pelo SWAT forçado pelo clima passado, para a bacia hidrográfica do arroio Fragata (BHAF) considerando os cenários futuros (P1, P2 e P3).....	104
Figura 29 - Variação entre as vazões médias mensais extraídas dos hidrogramas mensais simulados pelo SWAT forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HADGEM2 para os RCPs 4.5 e 8.5, e as vazões extraídas dos hidrogramas mensais simulados pelo SWAT forçado pelo clima passado, para a bacia hidrográfica do arroio Pelotas (BHAP) considerando os cenários futuros (P1, P2 e P3)	106
Figura 30 - Variação entre as vazões médias mensais extraídas dos hidrogramas mensais simulados pelo SWAT forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HADGEM2 para os RCPs 4.5 e 8.5, e as vazões extraídas dos hidrogramas mensais simulados pelo SWAT forçado pelo clima passado, para a bacia hidrográfica do rio Piratini (BHRP) considerando os cenários futuros (P1, P2 e P3).....	108
Figura 31 - Vazões médias anuais extraídas dos hidrogramas diários simulados pelo modelo hidrológico SWAT forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HADGEM2 para o clima passado (1961-2005) e projeções futuras de 2006 a 2099, considerando os RCPs 4.5 (a) e 8.5 (b), para a bacia hidrográfica do arroio Fragata (BHAF).....	111
Figura 32 - Vazões médias anuais extraídas dos hidrogramas diários simulados pelo modelo hidrológico SWAT forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HADGEM2 para o clima passado (1961-2005) e projeções futuras de 2006 a 2099, considerando os RCPs 4.5 (a) e 8.5 (b), para a bacia hidrográfica do arroio Pelotas.	112
Figura 33 - Vazões médias anuais extraídas dos hidrogramas diários simulados pelo modelo hidrológico SWAT forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HADGEM2 para o clima passado (1961-2005) e	

projeções futuras de 2006 a 2009, considerando os RCPs 4.5 (a) e 8.5 (b), para a bacia hidrográfica do arroio Piratini.	113
Figura 34 – Variação (PBIAS,%) nos valores de vazão média de longo termo (Q_{mt}) considerando as projeções do clima futuro em relação ao clima passado, para os RCPs 4.5 (a) e 8.5 (b).	116
Figura 35 - Produção de água ($l.s^{-1}.km^{-2}$) determinada a partir do hidrograma simulado pelo modelo hidrológico SWAT forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HADGEM2 para o clima passado (1961-2005) e projeções do clima futuro (2006 a 2009) considerando os RCPs 4.5 (a) e 8.5 (b) para bacia hidrográfica do arroio Fragata.	118
Figura 36 - Produção de água ($l.s^{-1}.km^{-2}$) determinada a partir do hidrograma simulado pelo modelo hidrológico SWAT forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HADGEM2 para o clima passado (1961-2005) e projeções do clima futuro (2006 a 2009) considerando os RCPs 4.5 (a) e 8.5 (b) para a bacia hidrográfica do arroio Pelotas.	119
Figura 37 - Produção de água ($l.s^{-1}.km^{-2}$) determinada a partir do hidrograma simulado pelo modelo hidrológico SWAT forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HADGEM2 para o clima passado (1961-2005) e projeções do clima futuro (2006 a 2009) considerando os RCPs 4.5 (a) e 8.5 (b) para a bacia hidrográfica do rio Piratini.	120
Figura 38 – Máximas vazões médias mensais extraídas dos hidrogramas mensais simulados pelo modelo hidrológico SWAT forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HADGEM2 para o clima passado (1961 a 2005) e projeções futuras (2006 a 2009), considerando os RCPs 4.5 (a) e 8.5 (b), para a bacia hidrográfica do arroio Fragata.	123
Figura 39 - Máximas vazões médias mensais extraídas dos hidrogramas mensais simulados pelo modelo hidrológico SWAT forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HADGEM2 para o clima passado (1961 a 2005) e projeções futuras (2006 a 2009), considerando os RCPs 4.5 (a) e 8.5 (b), para a bacia hidrográfica do arroio Pelotas.	124
Figura 40 - Máximas vazões médias mensais extraídas dos hidrogramas mensais simulados pelo modelo hidrológico SWAT forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HADGEM2 para o clima passado	

(1961 a 2005) e projeções futuras (2006 a 2009), considerando os RCPs 4.5 (a) e 8.5 (b), para a bacia hidrográfica do rio Piratini.	125
Figura 41 – Variação (PBIAS,%) nos valores de vazão média de enchente (Q_{me}) quando comparados os dados obtidos por Ensemble Mean para o clima passado e para as projeções do clima futuro considerando os RCPs 4.5 (a) e 8.5 (b) na bacia hidrográfica do arroio Fragata, bacia hidrográfica do arroio Pelotas e na bacia hidrográfica do rio Piratini.	126
Figura 42 – Mínimas vazões médias anuais extraídas dos hidrogramas mensais simulados pelo modelo hidrológico SWAT forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HADGEM2 para o clima passado (1961 a 2005) e projeções futuras (2006 a 2009), considerando os RCPs 4.5 (a) e 8.5 (b), para a bacia hidrográfica do arroio Fragata.	129
Figura 43 – Mínimas vazões médias anuais extraídas dos hidrogramas mensais simulados pelo modelo hidrológico SWAT forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HADGEM2 para o clima passado (1961 a 2005) e projeções futuras (2006 a 2009), considerando os RCPs 4.5 (a) e 8.5 (b), para a bacia hidrográfica do arroio Pelotas.	130
Figura 44 – Mínimas vazões médias anuais extraídas dos hidrogramas mensais simulados pelo modelo hidrológico SWAT forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HADGEM2 para o clima passado (1961 a 2005) e projeções futuras (2006 a 2009), considerando os RCPs 4.5 (a) e 8.5 (b), para a bacia hidrográfica do rio Piratini.	131
Figura 45 – Variação (PBIAS,%) nas médias das mínimas vazões médias anuais quando comparados os dados obtidos por Ensemble Mean para o clima passado e para as projeções do clima futuro perante os RCPs 4.5 (a) e 8.5 (b) na bacia hidrográfica do arroio Fragata, na bacia hidrográfica do arroio Pelotas e na bacia hidrográfica do rio Piatini.	132
Figura A1 - Resultados do teste de tendência de Mann-Kendall aplicado aos dados de precipitação total anual, oriundos do modelo ETA-BESM, para o clima passado (1961-2005) e para os cenários futuros dos RCP's 4.5 e 8.5.	1576
Figura A2 - Resultados do teste de tendência de Mann-Kendall aplicado aos dados de precipitação total anual, oriundos do modelo ETA-CANESM2, para o clima passado (1961-2005) e para os cenários futuros dos RCP's 4.5 e 8.5.	157

Figura A3 - Resultados do teste de tendência de Mann-Kendall aplicado aos dados de precipitação total anual, oriundos do modelo ETA-HADGEM2-ES, para o clima passado (1961-2005) e para os cenários futuros dos RCP's 4.5 e 8.5.	16158
Figura A4 - Resultados do teste de tendência de Mann-Kendall aplicado aos dados de precipitação total anual, oriundos do modelo ETA-MIROC5, para o clima passado (1961-2005) e para os cenários futuros dos RCP's 4.5 e 8.5.	16159
Figura A5 - Resultados do teste de tendência de Mann-Kendall aplicado aos dados de temperatura média diária anual, oriundos do modelo ETA-BESM, para o clima passado (1961-2005) e para os cenários futuros dos RCP's 4.5 e 8.5.	1610
Figura A6 - Resultados do teste de tendência de Mann-Kendall aplicado aos dados de temperatura média diária anual, oriundos do modelo ETA-CANESM2, para o clima passado (1961-2005) e para os cenários futuros dos RCP's 4.5 e 8.5.	161
Figura A7 - Resultados do teste de tendência de Mann-Kendall aplicado aos dados de temperatura média diária anual, oriundos do modelo ETA-HADGEM2-ES, para o clima passado (1961-2005) e para os cenários futuros dos RCP's 4.5 e 8.5.	1612
Figura A8 - Resultados do teste de tendência de Mann-Kendall aplicado aos dados de temperatura média diária anual, oriundos do modelo ETA-MIROC5, para o clima passado (1961-2005) e para os cenários futuros dos RCP's 4.5 e 8.5.	1613

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Informações das estações meteorológicas (M), pluviométricas (P) e fluviométricas (F) empregadas	44
Tabela 2 - Modelos Climáticos Globais (MCG's), com ênfase na referência e na forma com que consideram o ano civil, em número de dias, para suas simulações	53
Tabela 3 – Compilação dos resultados com relação ao uso do solo, tipo de solo e declividade para a bacia hidrográfica do arroio Fragata (BHAF), bacia hidrográfica do arroio Pelotas e para a bacia hidrográfica do rio Piratini (BHRP)	59
Tabela 4 – Área total resultante e quantificação dos níveis de discretização (sub-bacia e HRU) para as bacias hidrográficas do arroio Fragata (BHAF), do arroio Pelotas (BHAP) e do rio Piratini (BHRP)	64
Tabela 5 - Estatísticas aplicadas para a avaliação do desempenho do modelo SWAT objetivando as simulações de vazões diárias e mensais para os períodos de calibração e validação nas bacias hidrográficas do arroio Fragata (BHAF), do arroio Pelotas (BHAP) e do rio Piratini (BHRP)	72
Tabela 6 – Vazão média de longo termo (Q_{mlt}) e produção de água para as bacias do arroio Fragata (BHAF), do arroio Pelotas (BHAP) e do rio Piratini (BHRP)	83
Tabela 7 – Vazões de referência da curva de permanência e suas respectivas vazões médias observadas e estimadas para as bacias hidrográficas dos arroios Fragata (BHAF) e Pelotas (BHAP) e do rio Piratini (BHRP)	84
Tabela 8 – Temperatura média mensal ($^{\circ}\text{C}$) para as bacias hidrográficas do arroio Fragata, do arroio Pelotas e do rio Piratini, derivada dos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, MIROC5 e ETA-HADGEM2 e Ensemble Mean para o RCP 4.5 e RCP 8.5 considerando o clima passado (CP) e os períodos futuros P1, P2 e P3	86
Tabela 9 – Precipitação média mensal (mm) para as bacias hidrográficas do arroio Fragata, do arroio Pelotas e do rio Piratini, derivada dos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, MIROC5 e ETA-HADGEM2 e Ensemble Mean para o RCP 4.5 e RCP 8.5 considerando o clima passado (CP) e os períodos futuros P1, P2 e P3	87
Tabela 10 - Erro na estimativa das vazões médias mensais (PBIAS, %) entre os dados observados e simulados e o erro médio (PBIAS médio, %) entre os meses	

do ano para as bacias hidrográficas do arroio Fragata (BHAF) e do arroio Pelotas (BHAP), considerando o período de 1965 a 2005.....	92
Tabela 11 – Desempenho do modelo hidrológico SWAT forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HADGEM2 em simular as vazões médias mensais nas bacias hidrográficas do arroio Fragata (BHAF) e do arroio Pelotas (BHAP) com base em seis intervalos de percentil ($<Q_5$, Q_5 - Q_{25} , Q_{25} - Q_{50} , Q_{50} - Q_{75} , Q_{75} - Q_{95} e $\geq Q_{95}$) considerando o coeficiente de correlação (R) e o erro relativo na estimativa das vazões (PBIAS,%) e a vazão ($Q, m^3 s^{-1}$) do intervalo superior de percentil para cada modelo climático (Q_5 , Q_{25} , Q_{50} , Q_{75} , Q_{95})	97
Tabela 12 - Síntese da análise de tendência com nível de significância de 5%, pelo teste de Mann-Kendall, para o clima passado e as projeções futuras de vazão média anual	115

Lista de Abreviaturas e Siglas

ANA	Agência Nacional de Águas
AR4	Quarto Relatório de Avaliação
AR5	Quinto Relatório de Avaliação
BDMEP	Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa
BESM	Brazilian Earth System Model
BHAF	Bacia Hidrográfica do Arroio Fragata
BHAP	Bacia Hidrográfica do Arroio Pelotas
BHMSG	Bacia Hidrográfica Mirim-São Gonçalo
BHRP	Bacia Hidrográfica do Rio Piratini
CANESM2	Canadian Earth System Model versão 2
COREDE-SUL	Conselho Regional de Desenvolvimento da Região Sul
CP	Clima passado (1965 a 2005)
CPTEC	Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ENVI	Environment for Visualizing Images
ESD	Escoamento superficial direto
HADGEM2	Hadley Centre Global Environmental Model versão 2
HRU	Unidade de resposta hidrológica
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
LASH	Lavras Simulation of Hydrology

LandSat	Land Remote Sensing Satellite
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDE-HC	Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente
MCG	Modelo Climático Global
MCR	Modelo Climático Regional
MNTP	Temperatura mínima do ar a 2m da superfície
MXTP	Temperatura máxima do ar a 2m da superfície
MIROC5	Model for Interdisciplinary Research on Climate versão 5
NS	Coeficiente de Nash e Sutcliffe
NS log	Coeficiente de Nash e Sutcliffe logaritmizado
OCIS	Radiação de onda curta incidente à superfície
PBIAS	Erro percentual
PREC	Precipitação total
PROJETA	Projeções de Mudanças do Clima para a América do Sul Regionalizados pelo Modelo ETA
P1	Período futuro 1 (2006 a 2040)
P2	Período futuro 2 (2041 a 2070)
Q_{mt}	Vazão média de longo termo
Q_{me}	Vazão média de enchente
RCP	Caminho Representativo de Concentração
SIG	Sistemas de Informações Geográficas
SRTM	Shuttle Radar Topographic Mission
SWAT	Soil and Water Assessment Tool
SWAT-CUP	SWAT – Calibration Uncertainty Procedure

SUFI-2	Sequential Uncertainty Fitting
UNESCO	Organização Educacional Científica e Cultural das Nações Unidas
UR2M	Umidade relativa do ar a 2m da superfície
WWAP	World Water Assessment Programme
W10M	Intensidade do vento a 10m da superfície

Sumário

Lista de Figuras.....	9
Lista de Tabelas	16
Lista de Abreviaturas e Siglas	18
Sumário	21
1 Introdução	23
1.1. Hipóteses	25
1.2. Objetivo geral	25
1.3. Objetivos específicos.....	25
2 Revisão de Literatura	26
2.1. Recursos Hídricos e Hidrologia	26
2.2. Modelos hidrológicos.....	28
2.3. O modelo SWAT.....	30
2.4. Mudanças climáticas	34
2.5. Impactos das mudanças climáticas	37
3 Material e Métodos.....	40
3.1. Contextualização e importância da área de estudo.....	40
3.2. SWAT	42
3.2.1. Base de dados hidrológicos e meteorológicos	42
3.2.2. Base de dados espacial	45
3.2.3. Processamentos iniciais no SWAT.....	50
3.2.4. Calibração e validação do modelo	50
3.2.5. Análise de desempenho	51
3.3. Projeções climáticas e análise de tendência	52
3.4. Avaliação do escoamento simulado para o clima passado	55
3.5. Impacto das mudanças climáticas sobre os indicadores hidrológicos.....	57
4 Resultados e Discussão.....	58

4.1.	Compilação da bases de dados no SWAT	58
4.2.	Desempenho do modelo SWAT	65
4.2.1.	Calibração e validação	65
4.2.2.	Análise de indicadores hidrológicos	78
4.3.	Projeções climáticas.....	85
4.4.	Avaliação do hidrograma e indicadores hidrológicos para o clima passado.....	89
4.5.	Impacto das mudanças climáticas sobre os indicadores hidrológicos	98
4.5.1.	Vazões médias.....	99
4.5.2.	Vazões máximas	122
4.5.3.	Vazões mínimas	128
5	Considerações Finais.....	133
6	Limitações do estudo	134
	REFERÊNCIAS.....	136
	APÊNDICES.....	155

1 Introdução

As mudanças climáticas causadas por atividades humanas tornaram-se uma preocupação crescente em todo o mundo. Estas mudanças têm tornado a gestão dos recursos hídricos mais difícil visto que as condições hidrológicas se alterarão de uma maneira altamente incerta no futuro, onde se espera que a temperatura e a precipitação variem consideravelmente de região para região e, consequentemente, a variabilidade nos padrões espaciais e temporais dessas variáveis podem trazer mudanças significativas nos climas que, por sua vez, podem afetar a agricultura, o desenvolvimento industrial e urbano (FAHAD et al., 2018). Com uma tendência de aumento da frequência de eventos hidrológicos extremos, como inundações e secas, se torna evidente a importância da investigação dos impactos que essas mudanças causam na hidrologia e nos recursos hídricos (DOLL et al. 2016; ZHANG; XU e FU, 2014).

Para entender e resolver os possíveis problemas de gerenciamento de recursos hídricos associados ao abastecimento de água, geração de energia e práticas agrícolas, bem como para o planejamento futuro dos recursos hídricos, projeto e gerenciamento de reservatórios e proteção do meio ambiente, é necessário fornecer estimativas quantitativas dos efeitos das mudanças climáticas sobre os processos hidrológicos (MENGISTU e SORTEBERG, 2012). Essas estimativas têm sido analisadas com o suporte de modelos hidrológicos, os quais possuem potencial para fornecer estimativas confiáveis do escoamento ao longo do tempo, desde a superfície da terra até rios e corpos d'água, auxiliando os tomadores de decisão no desenvolvimento de planos de gerenciamento de bacias hidrográficas (SETEGN et al., 2010).

Modelos hidrológicos são capazes de avaliar os impactos das projeções do clima futuro, como o modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT) (ARNOLD et al., 1998). O SWAT é um modelo hidrológico semi-distribuído que tem sido amplamente utilizado (ZHANG; XU e FU, 2014), permite a contabilização de várias ações de gerenciamento, incluindo a consideração das melhores práticas de gestão e mudança de uso do solo (VIGIAK et al., 2017), além de ser amplamente utilizado em grandes bacias transfronteiriças (MALAGÓ et al., 2017).

A associação de Modelos Climáticos Globais (MCGs) que trazem projeções do clima futuro e modelos hidrológicos tem sido a abordagem mais comum para avaliar os impactos das mudanças climáticas (ZHANG; XU e FU, 2014). Os cenários futuros do clima global podem ser simulados através de MCGs e apesar de serem utilizados nas investigações que apontam mudanças na temperatura, precipitação e nível do mar devido ao aumento de emissões de gases com efeito estufa, Oliveira et al. (2017) apontam que o estudo desses impactos hidrológicos usando simulações dos MCGs tem sido amplamente aplicado na escala regional, onde passam a ser denominados como Modelos Climáticos Regionais (MCRs). Os MCRs utilizam dados refinados com base nas características climáticas globais e podem aumentar a eficácia da gestão e planejamento regional dos recursos hídricos, bem como reduzir as perdas causadas por enchentes e secas (OUYANG et al., 2015).

O Brasil depende fortemente de seus recursos hídricos, que são utilizados principalmente para consumo humano, irrigação e produção de energia elétrica, tornando o país vulnerável a mudanças nos padrões de precipitação e regime hidrológico (OLIVEIRA et al., 2017). Portanto, a avaliação do potencial dos impactos das mudanças climáticas na hidrologia é fundamental para uma melhor compreensão, planejamento e gerenciamento de recursos hídricos para fornecimento contínuo de seus recursos hídricos e serviços ecológicos, principalmente sob clima do bioma Pampa. Existem alguns estudos realizados no Brasil sobre impactos hidrológicos relacionados às mudanças climáticas (ALVARENGA et al. 2018; NETO et al. 2016; OLIVEIRA et al. 2019; SANTOS et al. 2019), porém, somente Caldeira (2019) aborda sobre esta temática considerando o bioma em questão.

A atividade econômica da região da bacia hidrográfica Mirim-São Gonçalo (BHMSG) é extremamente sensível às variações do regime hídrico, dessa forma, tornam-se imprescindíveis e necessários estudos que considerem a previsão e a avaliação dos impactos associados às mudanças do clima na bacia em questão. Segundo Steinmetz et al. (2018), a BHMSG é uma bacia transfronteiriça de grande importância ambiental, econômica, com ênfase no abastecimento público, pesca, navegação, pecuária e agricultura.

1.1. Hipóteses

As hipóteses do presente estudo são: i. O modelo SWAT permite representar de forma adequada o comportamento hidrológico nas sub-bacias analisadas; ii. Os hidrogramas simulados a partir da modelagem hidrológica e dos modelos climáticos (período histórico) geram indicadores semelhantes aos alcançados pelos hidrogramas observados; iii. As projeções climáticas deverão indicar a elevação da precipitação anual e da temperatura média diária anual; e, iv. As mudanças climáticas ocasionarão aumento nos indicadores de vazões médias e máximas, assim como de produção de água nas três sub-bacias analisadas.

1.2. Objetivo geral

O objetivo geral deste estudo concerne à avaliação dos impactos de mudanças climáticas sobre o comportamento hidrológico em sub-bacias da bacia hidrográfica Mirim-São Gonçalo, empregando modelos climáticos globais acoplados com modelo regional e o modelo hidrológico SWAT para a simulação hidrológica.

1.3. Objetivos específicos

Os objetivos específicos foram: i. Calibrar e validar o SWAT nas sub-bacias hidrográficas do arroio Pelotas, arroio Fragata e rio Piratini (sub-bacias da bacia hidrográfica Mirim-São Gonçalo); ii. Avaliar o desempenho do SWAT frente à representação do escoamento total para cada sub-bacia; iii. Avaliar a correspondência dos hidrogramas simulados com os hidrogramas observados a partir do clima passado modelado pelos modelos climáticos; iv. Averiguar o comportamento das sub-bacias hidrográficas considerando a análise de variáveis resposta de acordo com dois cenários (RCP 4.5 E RCP 8.5) de mudanças climáticas.

2 Revisão de Literatura

2.1. Recursos Hídricos e Hidrologia

De todos os recursos globais, a água é um dos mais importantes, já que é usada para muitos propósitos, como ingestão, produção de alimentos, irrigação agrícola e processos industriais. A água na Terra, sua ocorrência, circulação e distribuição, suas propriedades químicas e físicas e sua reação com o ambiente, incluindo sua relação com os seres vivos, é estudada pela ciência conhecida como hidrologia, a qual tem o ciclo hidrológico como principal princípio (CHOW, MAIDMENT e MAYS, 1988).

De acordo com Chow, Maidement e Mays (1988), no ciclo hidrológico a água que evapora dos oceanos e da superfície terrestre é transportada pela Terra através da circulação atmosférica na forma de vapor d'água, precipita novamente como chuva, neve ou outras formas, é interceptada por árvores e vegetação, fornece escoamento na superfície terrestre, infiltra-se no solo, recarrega as águas subterrâneas, descarrega em cursos d'água e, finalmente, flui para os oceanos, dos quais acabará por evaporar mais uma vez. Este sistema, alimentado pela energia solar, impulsionado pela gravidade, prossegue sem fim na presença ou ausência de atividade humana.

Dentre as regiões de importância prática para os hidrólogos destacam-se as bacias hidrográficas, por causa da simplicidade que oferecem na aplicação do balanço da água, o qual pode ser desenvolvido para avaliar os componentes do ciclo hidrológico em uma região hidrologicamente determinada (CARVALHO e SILVA, 2006). A bacia hidrográfica é um local de considerável relevância para o estudo da água, visto que é nessa área que, além de ocorrer o desenvolvimento e o crescimento da população, também ocorrem práticas para planejamento e gestão dos múltiplos usos dos recursos hídricos (BIANCHI, 2013). Bacia hidrográfica é, portanto, uma área delimitada espacialmente por um divisor de água, constituída por uma rede de drenagem interligada, cujo escoamento converge para uma seção comum, denominada de seção de controle ou exutório da bacia (MELLO e SILVA, 2013).

Para Mendingo e Tucci (1997), o ciclo hidrológico deve ser analisado dentro de seus componentes, de acordo com a dinâmica de sua ocorrência e sobre as características do sistema, sendo que a dinâmica envolve as mudanças das variáveis no tempo e no espaço, enquanto que o espaço incorpora também as características do sistema, as quais apresentam pouca variação em curto período de tempo. Esses processos são extremamente não-lineares e agem diretamente sobre o meio e a vida no planeta, ressaltam os autores.

De acordo com Tucci (2009), pode-se começar a descrever o ciclo hidrológico a partir do vapor de água presente na atmosfera proveniente da evaporação. Para Allen et al. (1998), a evaporação é o processo pelo qual a água no estado líquido é convertida para o estado de vapor e, então, removida da superfície de evaporação. Este processo, segundo os autores, ocorre devido à energia proveniente da radiação solar direta e da temperatura do ar, além de ser influenciado também pela umidade do ar e pela velocidade do vento.

Mello e Silva (2013) consideram que o vapor de água encontrado na atmosfera se condensa formando microgotículas de água suspensas no ar que, quando agrupadas, formam as nuvens. Os autores ainda mencionam que é através da dinâmica das massas de ar que acontece a principal transferência de água da atmosfera para a superfície terrestre, sendo considerada também como a principal componente de entrada do ciclo hidrológico na sua fase terrestre – a precipitação, sendo a chuva a mais comum em regiões tropicais e subtropicais.

Conforme Tucci (2009), parte da água precipitada sofre interceptação em folhas e caules, de onde evapora ou é reprecipitada para o solo. A água que atinge o solo segue diversos caminhos, como a infiltração, que pode ocorrer devido ao solo poroso cuja umidade alimentada pela infiltração é aproveitada em parte pelos vegetais, que absorvem pelas raízes e a devolvem à atmosfera por transpiração. Outro processo é o escoamento superficial, considerada a fase mais importante do ciclo hidrológico para a engenharia, pois trata da ocorrência e transporte da água na superfície terrestre onde os estudos hidrológicos estão ligados ao aproveitamento da água superficial e à proteção contra os fenômenos provocados pelo seu deslocamento (SILVA et al., 2006).

O escoamento superficial direto (ESD), juntamente com o escoamento subsuperficial e o escoamento de base, constituem os três componentes do

escoamento superficial, um segmento do ciclo hidrológico que estuda o deslocamento das águas na superfície da Terra, considerado um dos mais importantes para o manejo de bacias hidrográficas (SILVA et al., 2008). O ESD é também conhecido como deflúvio superficial e sua importância está diretamente associada a dimensionamentos hidráulicos, tais como barragens, terraços, bacias de contenção e controle da erosão hídrica (PRUSKI; BRANDÃO; SILVA, 2003; TUCCI, 2009).

Os instrumentos de gestão aplicados no contexto de bacias hidrográficas visam integrar componentes do ciclo hidrológico, implicando em modelos para distintas condições de uso e classes dos solos, índice de precipitação, infiltração e escoamento superficial, bem como as condições climáticas de cada região. Schuler (2003) afirma que a hidrologia em bacias hidrográficas busca conceituar e modelar estes diferentes processos hidrológicos no espaço e no tempo.

2.2. Modelos hidrológicos

De acordo Tucci (2005), os modelos hidrológicos surgiram com a necessidade de se obter séries hidrológicas mais longas e representativas de vazões para diferentes projetos de recursos hídricos e, normalmente, as séries de precipitação são mais longas que as de vazão. Além disso, conforme mesmo autor, com a modificação das bacias pela construção de obras hidráulicas e alterações no manejo do solo, as séries de vazões deixaram de ser homogêneas e estacionárias. Partindo da precipitação, é possível determinar ou estimar as vazões desconhecidas para os novos cenários existentes ou previstas para as bacias.

Os modelos hidrológicos podem ser classificados sob diferentes aspectos, todavia, comumente são empregadas classificações de acordo com o tipo de variáveis utilizadas na modelagem (estocásticos ou determinísticos), o tipo de relação entre essas variáveis (empíricos ou conceituais), a forma de representação dos dados (discretos ou contínuos), a existência ou não de relações espaciais (concentrados ou distribuídos) e a existência de dependência temporal (estacionários ou dinâmicos) (RENNÓ e SOARES, 2007).

De forma geral, nas últimas décadas, os modelos hidrológicos se desenvolveram em dois sentidos: modelos que buscam representar com maior

precisão e de forma distribuída, os processos hidrológicos (modelos distribuídos); e modelos que tratam de forma empírica a distribuição dos parâmetros em áreas de grande magnitude (modelos concentrados). A abordagem espacial distribuída começou a ser aplicada na modelagem hidrológica com a disseminação do uso de computadores nas décadas de 1960 e 1970 e à maior disponibilidade de dados hidrometeorológicos (BEVEN, 2004). Modelos hidrológicos distribuídos geralmente têm melhor desempenho do que a maioria dos modelos hidrológicos conceituais com estrutura concentrada ou semi-distribuída porque a variação espacial das variáveis hidrológicas é geralmente difícil ser considerada em modelos concentrados ou semi-distribuídos (CHEN, CHEN e XU, 2007).

De acordo com FUKUNAGA et al. (2015), um bom modelo hidrológico deve refletir corretamente as mudanças no uso da terra e no manejo agrícola e seus efeitos no escoamento. No entanto, a implementação desses modelos geralmente requer a integração de Sistemas de Informações Geográficas (SIG), sensoriamento remoto e múltiplos bancos de dados para o desenvolvimento de parâmetros de entrada do modelo e para a análise e visualização dos resultados da simulação (HE, 2003).

Prever o impacto das mudanças nas bacias hidrográficas tornou-se uma atividade corriqueira para os hidrólogos, que são cada vez mais preocupados com o fato de que os modelos que eles usam para simulação, previsão ou projeção em ferramentas de avaliação de impacto e suporte à decisão podem não estar adequadas para lidar com mudanças como a cobertura do solo ou das características estatísticas das condições climáticas de uma bacia (THIREL et al., 2015). O planejamento e a gestão de recursos hídricos requerem modelos hidrológicos para compreender o comportamento de escoamento em uma bacia hidrográfica. Para bacias hidrográficas com dados limitados, a escolha de modelo e dos seus parâmetros de identificação é considerada uma etapa importante para a estimativa de hidrogramas de escoamento direto (AHMAD et al., 2010).

Os modelos hidrológicos são importantes ferramentas utilizadas para o desenvolvimento de estratégias de gerenciamento de água. No entanto, como a geração de escoamento em uma bacia hidrográfica é um processo complexo, uma variedade de métodos tem sido usada nos vários modelos hidrológicos para estimar as áreas que contribuem com o escoamento (GOLMOHAMMADI et al., 2017). Os

usuários dos modelos têm a responsabilidade de tomar uma série de decisões críticas no desenvolvimento, calibração e validação de modelos para garantir que o modelo simule com precisão as condições do mundo real (DAGGUPATI et al., 2015).

Segundo Pereira et al. (2016), a análise dos indicadores hidrológicos é fundamental para a gestão dos recursos hídricos da bacia, fornecendo à simulação hidrológica uma ferramenta viável para prever tanto os picos de vazão, utilizados no estudo de inundações por meio das vazões máximas, como também considerando as vazões mínimas, utilizadas para vários outros fins. A análise dos diferentes indicadores hidrológicos presentes neste estudo é de fundamental importância visto que cada um deles está relacionado com diferentes explicações na hidrologia. Segundo Tucci (2009), a vazão máxima anual está relacionada com valores extremos de vazão que podem levar à ocorrência de cheias, e sua estimativa é relevante para o controle de inundações e dimensionamento de obras hidráulicas.

Outro indicador de relevância é a vazão média de longo termo (Q_{mlt}), que, de acordo com Beskow, Souza e Luz (2015), é utilizado para estimar a disponibilidade hídrica em uma bacia hidrográfica, sendo a média aritmética de todos os valores da série histórica e que representa a quantidade média de água disponível para atender à demanda proveniente das atividades humanas e para a conservação do ecossistema.

2.3. O modelo SWAT

O modelo SWAT (ARNOLD et al., 1998) foi desenvolvido pelo *Agricultural Research Service/United States Department of Agriculture* dos Estados Unidos. Ele permite a modelagem hidrológica de bacias hidrográficas e a análise de diversos cenários, como a predição dos impactos: do manejo do solo sobre a qualidade da água, do transporte de sedimentos, e do transporte de químicos agrícolas (NEITSCH et al., 2011). Ele pode ser usado para modelar o ciclo da água, a erosão, o crescimento da vegetação e a qualidade da água em grandes bacias hidrográficas e também para avaliar os efeitos de mudanças climáticas e gestão de recursos hídricos (TUO et al., 2018).

O SWAT é um modelo versátil que engloba diferentes componentes hidrológicos e agronômicos, e tem sido usado por muitos órgãos governamentais e empresas privadas para apoiar a tomada de decisão para problemas de recursos hídricos, bem como universidades e outras equipes institucionais envolvidas em pesquisas referentes a quantidade e qualidade da água. Uma ampla gama de diferentes tipos de análises foi realizada com a SWAT, incluindo mudanças climáticas e/ou cenários de mudanças no uso da terra, melhores estratégias de irrigação, os impactos de melhores práticas de manejo, adoção de culturas bioenergéticas, os impactos do transporte de nitratos e transporte de poluentes de sedimentos, nutrientes e / ou pesticidas (NEITSCH et al., 2011).

O modelo SWAT é um modelo de parâmetro semi-distribuído contínuo e de longo prazo que pode simular o escoamento superficial, o escoamento subsuperficial, a erosão do solo, a deposição de sedimentos e o movimento de nutrientes através de bacias hidrográficas (ARNOLD et al., 1998). Ele calcula o balanço hídrico da seguinte forma (Equação 1):

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R + Irr - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw})i \quad (1)$$

Onde, SW_t é o conteúdo final de água no solo (mm), SW_0 é o conteúdo inicial de água no solo (mm), t é o tempo (dias), e no dia i , R é a precipitação no dia i (mm), Irr é a irrigação (mm), Q_{surf} é o escoamento superficial (mm), E_a é a evapotranspiração (mm), w_{seep} é a água que entra no aquífero raso (mm), e Q_{gw} é o fluxo de retorno da água subterrânea (mm) (GITHUI, SELLE e THAYALAKUMARAN, 2012).

O SWAT usa dois tipos de unidades funcionais (NEITSCH et al., 2011): a Unidade de Resposta Hidrológica (HRU) e a sub-bacia. A HRU é uma unidade terrestre de propriedades ambientais e comportamento hidrológico homogêneos (solo, uso/cobertura do solo e topografia). A sub-bacia é uma região espacialmente definida composta por uma ou mais HRUs. As sub-bacias são combinadas em um sistema de ligação de nó que define o escoamento de cabeceiras para o exutório (VIGIAK et al., 2017). De forma simplificada, o SWAT divide as bacias hidrográficas em sub-bacias compostas de HRUs, caracterizados por diferentes combinações de uso do solo, características do solo e topografia.

A entrada de dados no SWAT é realizada em uma interface de programa de computador adequada através da interface em SIG (como o ArcSWAT ou QSWAT) e requer as seguintes informações digitais em mapas: modelo digital de elevação (MDE), tipo de solo, cobertura do solo e uso da terra. A interface do modelo toma essas entradas e subdivide a bacia em sub-bacias com base no mapa de direção do fluxo, que é derivado do MDE. Em seguida, extrai dados de entrada de cada banco de dados de sub-bacia. Posteriormente, promove o delineamento das HRUs, que possuem combinações únicas de topografia, cobertura e tipos de solo para cada sub-bacia. O balanço hídrico é simulado para cada HRU, e os resultados são agregados para a sub-bacia pela média ponderada. O modelo também requer informações meteorológicas sobre precipitação, radiação solar, velocidade do vento, umidade relativa e temperaturas máxima e mínima.

SWAT é encontrado em inúmeras aplicações em todo o mundo relacionadas a questões hidrológicas tão variadas, como a previsão clássica de vazão, mas também a estimativa do impacto das práticas de manejo da terra em erosão de sedimentos e ciclagem de nutrientes (ULLRICH e VOLK, 2009). Nos últimos anos, as análises da SWAT sobre os impactos de mudanças climáticas e/ou mudanças nas práticas de uso da terra sobre a vazão e a produção de água estão se tornando mais evidentes (FEREIDOOON e KOCH, 2018). Para o Brasil, devido às proporções continentais do território, há a necessidade de uma gama de ferramentas no auxílio a tomada de decisões referentes ao manejo dos recursos naturais. Neste contexto, a modelagem de bacias hidrográficas aparece como uma poderosa ferramenta de gestão de recursos hídricos, e o SWAT, como um dos modelos mais consistentes e utilizados ao redor do mundo (BRESSIANI et al., 2015).

De acordo com Gupta, Sorooshian e Yapo (1999), a utilidade de modelos hidrológicos para fins de previsões operacionais depende de quão bem o modelo é calibrado e não importa quão sofisticada seja a estrutura do modelo, se os parâmetros forem mal especificados, os fluxos simulados pelo modelo podem ser bem diferentes daqueles realmente observados. Portanto, o procedimento de calibração deve ser conduzido cuidadosamente para maximizar a confiabilidade do modelo (GUPTA, SOROOSHIAN e YAPO, 1999) e, para que isso ocorra, é fundamental a etapa da análise de sensibilidade.

A análise de sensibilidade é o processo de determinação da taxa de mudança na saída do modelo em relação às mudanças nas entradas do modelo (parâmetros) (ARNOLD et al., 2012). Como muitos desses modelos hidrológicos têm a intenção de ser aplicados a diferentes bacias hidrográficas, eles normalmente têm parâmetros que devem ser ajustados para que o comportamento do modelo corresponda ao comportamento da bacia hidrográfica de interesse. O processo de ajuste desses parâmetros é chamado de estimação de parâmetro ou calibração de modelo (GUPTA, SOROOSHIAN e YAPO, 1999).

Ma et al. (2000) mencionam que é necessário identificar os parâmetros-chave e a precisão do parâmetro necessária para a calibração pois permite, de acordo com Arnold et al. (2012), em um sentido prático, a determinação dos processos predominantes para o componente de interesse e fornecem informações sobre a sensibilidade dos parâmetros, etapas necessárias na calibração do modelo. A calibração de um modelo permite a tentativa de reduzir a incerteza ao estimar os parâmetros do modelo a fim de obter melhor parametrização para condições específicas. As incertezas dos modelos são geralmente devido a entradas do modelo (por exemplo, variáveis climáticas ou propriedades do solo), valores de parâmetros e estrutura do modelo, mas a incerteza das observações usadas para calibração e validação do modelo também deve ser considerada (SOOD e SMAKHTIN, 2015).

A calibração do modelo SWAT pode ser feita manualmente ou de forma automática usando, por exemplo, o SWAT-CUP (SWAT – *Calibration Uncertainty Procedure*). O SWAT-CUP foi desenvolvido para ajudar os usuários na calibração e possui diferentes métodos de calibração (ABBASPOUR et al., 2015): GLUE (*Generalized Likelihood Uncertainty Estimation*); ParaSol (*Parameter Solution*); MCMC (*Markov chain Monte Carlo*); PSO (*Particle Swarm Optimization*) e SUFI-2 (*Sequential Uncertainty Fitting*). Entre as técnicas de calibração disponíveis no SWAT-CUP, o SUFI 2 é o que precisa do menor número de iterações para alcançar bons intervalos de incerteza de previsão com cobertura razoável de pontos de dados (YANG et al., 2008).

Por fim, a última etapa de verificação de um modelo hidrológico é a validação dos ajustes realizados nos parâmetros. A validação compreende em executar o modelo utilizando os parâmetros que foram medidos ou determinados durante o

processo de calibração, e comparar as previsões geradas pelo modelo aos dados observados, não considerados na calibração. Os processos de calibração e validação geralmente são realizados separando os dados observados disponíveis em duas partes: uma para calibração e outra para validação (ARNOLD et al., 2012).

2.4. Mudanças climáticas

Em 1988, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) foi criado pela Organização Meteorológica Mundial e pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente com o objetivo de apoiar com trabalhos científicos as avaliações do clima e os cenários de mudanças climáticas para o futuro. Em seu Quarto (AR4) (IPCC, 2007) e Quinto (AR5) Relatórios de Avaliação (IPCC, 2013), o IPCC afirma que o clima global mudou de forma comprovada desde os tempos pré-industriais e que os estudos consistentemente encontram fortes evidências de influências antropogênicas no clima. A mudança climática está afetando todos os sistemas naturais da Terra, desde os ciclos da água, do nível do mar e da circulação oceânica até a produtividade dos sistemas naturais e agrícolas, e a abundância de espécies de plantas e animais. Influencia a saúde e o bem-estar humano, através de mudanças na oferta e demanda de água, alimento e energia (SIMONOVIC, 2017).

Mudanças climáticas recentes têm impactos observáveis nos processos do ciclo hidrológico e afetarão ainda mais os sistemas hidrológicos no futuro (JU et al., 2014). A água está envolvida em todos os componentes do sistema climático (atmosfera, hidrosfera, criosfera, superfície terrestre e biosfera). Portanto, a mudança climática afeta a água através de vários mecanismos (BATES et al., 2008). O aumento da temperatura global tem o potencial de desencadear novas mudanças climáticas que possam alterar o ciclo hidrológico e afetar as quantidades e padrões de precipitação devido à maior evapotranspiração (MOZAYYAN et al., 2017). Mudanças prováveis nas variáveis climáticas podem levar ao superaquecimento e a períodos de verão secos em algumas regiões e a fortes chuvas e enchentes nas regiões mais úmidas (BATES et al., 2008).

De acordo com Ju et al. (2014), essa futura mudança climática certamente irá agravar os impactos nos ciclos hidrológicos globais e regionais, afetando a

distribuição espaço-temporal de vários componentes hidrológicos do ciclo hidrológico, como precipitação, evaporação, escoamento e infiltração. Consequentemente, a alocação de recursos hídricos no espaço e no tempo será alterada, aumentando assim a probabilidade de uma variedade de eventos extremos hidrológicos, tais como inundações e secas (JU et al. 2014).

Diversos estudos têm sido realizados em diferentes escalas que vão desde pequenas bacias hidrográficas a todo o globo para avaliar os impactos das mudanças climáticas nos sistemas hidrológicos (JHA et al., 2006). Embora a mudança climática seja uma questão global, o impacto dela é principalmente experimentado por comunidades regionais que dependem fortemente de setores sensíveis ao clima, como agricultura, recursos hídricos e silvicultura para sua subsistência (XU et al., 2013). A mudança de variáveis climáticas, como temperatura, padrões de precipitação e concentração de dióxido de carbono na atmosfera, terá impacto sobre outras variáveis relacionadas com a água, como evapotranspiração, vazão, umidade do solo, afetando direta ou indiretamente a produção agrícola (FEREIDON e KOCH, 2018).

As projeções climáticas futuras, também conhecidas por cenários futuros, geralmente são obtidas a partir de simulações numéricas de modelos climáticos globais. Com as melhorias significativas na modelagem climática nas últimas décadas, os modelos climáticos globais são considerados uma das melhores ferramentas disponíveis para o estudo dos impactos das mudanças climáticas (LU et al., 2012). Essas projeções são elaboradas usando MCGs, que representam processos físicos da atmosfera, do oceano e da superfície terrestre e simulam o sistema climático global (RANDALL, 2000) e são utilizados para reproduzir observações características do clima recente e alterações do clima passado (SANTOS et al. 2015).

A resolução horizontal da maioria dos MCGs atuais é da ordem de algumas centenas de quilômetros (MEEHL et al., 2007), o que limita sua capacidade de representar topografia complexa, características da superfície terrestre e outros processos no sistema climático. Isso impede que os MCGs gerem informações realistas e confiáveis sobre mudanças climáticas em escalas menores, o que é imperativo para o desenvolvimento de estratégias adequadas de adaptação e mitigação na escala regional para local (GIORGI, JONES e ASRAR, 2009).

Portanto, aprimorar os resultados dos MCGs usando um MCR ou um modelo de downscaling estatístico é necessário e útil (XU et al., 2017). Neste contexto, diversos estudos utilizando técnicas de regionalização de MCGs na América do Sul têm sido realizados a fim de avaliar os potenciais impactos sobre o clima e sobre os recursos naturais, destacando-se os de Chou et al. (2012), Marengo et al. (2011), Marengo et al. (2010) e Pesquero et al. (2009).

Apesar da grande aplicação, o grande problema é na confiabilidade que os MCGs apresentam em níveis regionais (SANTOS et al. 2015). Giorgi e Mearns (2002) apontam que uma avaliação abrangente das projeções de mudanças regionais precisa ser baseada na informação coletiva de um conjunto de simulações de modelos. Uma das formas de obtenção de incertezas é obter um panorama único para um determinado cenário através de uma média dos diferentes modelos (*ensemble* de modelos), os quais demonstram ser eficientes na redução do viés e da incerteza nas projeções climáticas do modelo individual, e podem fornecer projeções climáticas regionais mais confiáveis (NIU et al., 2018). Quantificar as incertezas nas projeções de cenários climáticos futuros a partir de *ensemble* tem sido verificada em diversos estudos, como em Auger et al. (2018), Chou et al. (2012), Li et al. (2016), Marengo et al. (2011) e Moussa, Sellami e Mlayh et al. (2018).

Como mencionado anteriormente, os MGCs podem simular os cenários futuros de mudanças climáticas. Em 2000, em seu Relatório Especial sobre Cenários de Emissão, o IPCC desenvolveu diferentes famílias de cenários futuros de mudanças climáticas, baseado na emissão de gases de efeito estufa com projeções até 2099. Porém, segundo Van Vuuren et al. (2011), houve a necessidade de desenvolver novos cenários que apresentassem um maior nível de detalhamento e que explorassem explicitamente o impacto de diferentes estratégias climáticas governamentais antes não abordados pelos cenários previamente existentes (OLIVEIRA, 2016).

Neste contexto, novos cenários foram desenvolvidos pela comunidade científica e aprovados pelo IPCC para compor o AR5 (IPCC, 2013). Assim, criaram-se os Cenários Representativos de Concentração (*Representative Concentration Pathways* – RCP), os quais se baseiam nas forçantes radiativas antropogênicas ao final do século 21. Quatro diferentes cenários foram desenvolvidos: RCP 2.6, RCP

4.5, RCP 6.0 e RCP 8.5, os quais correspondem às forçantes radiativas de $2,6 \text{ W m}^{-2}$, $4,5 \text{ W m}^{-2}$, 6 W m^{-2} e $8,5 \text{ W m}^{-2}$. Essas estimativas são baseadas na concentração de gases de efeito estufa e outros agentes (CHOU et al., 2014; VAN VUUREN et al., 2011).

O RCP 2.6 representa um cenário de mitigação com nível forçante muito baixo, o que implica em redução substancial da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera até o fim do século XXI. Os RCPs 4.5 e 6.0 representam cenários médios de estabilização e o RCP 8.5 representa uma grande concentração de gases de efeito estufa na atmosfera em 2099 (VAN VUUREN et al., 2011). Para o RCP6.0 e RCP8.5, o forçamento radiativo não culmina em 2100; para o RCP2.6, ele atinge o pico e decresce; e para o RCP4.5, ele estabiliza em 2100 (IPCC, 2013).

2.5. Impactos das mudanças climáticas

Em conformidade com Bates et al. (2008), é importante lembrar que a maioria dos problemas e impactos ligados às mudanças climáticas não são novos. De fato, as sociedades em geral sempre enfrentaram inundações, escassez de água, ondas de calor, secas prolongadas, variabilidade de vazões, aumentos de temperatura e diminuição das chuvas com impactos relacionados às lavouras. Embora seja difícil atribuir ao aquecimento global a ocorrência de um fenômeno particular, existem diferentes estudos que sugerem que a mudança climática causará maior frequência e amplificação desses problemas (BATES et al., 2008).

Conforme Vargas-Amelin e Pindado (2014), a mudança climática é um problema intimamente relacionado aos padrões de desenvolvimento humano, crescimento e consumo e uma das dificuldades em lidar com ela reside justamente em suas características abrangentes e que se expandem a outros setores. E a capacidade adaptativa de lidar com seus efeitos, de acordo com os autores, são problemas adicionais relacionados com a desconexão territorial entre as emissões e os impactos, a vulnerabilidade dos sistemas, a dificuldade de conseguir uma coordenação adequada entre as várias administrações e o envolvimento das partes interessadas nos processos de tomada de decisão.

Especialmente no setor de água, a competição por recursos entre os diferentes usuários e grupos de interesse está se intensificando e a agricultura

ainda é, de longe, a maior usuária de água na maioria das regiões com escassez de água, mas as demandas de outros setores vêm aumentando consideravelmente (BIEMANS, 2012; VOROSMARTY et al., 2010). Para a agricultura, a mudança climática apresenta um grande desafio, tanto pela volatilidade dos preços e aumento da demanda global por alimentos quanto pela introdução de biocombustíveis (DAVIRON et al., 2011).

Espera-se que os impactos sejam diversos e heterogêneos, afetando tanto a qualidade quanto a quantidade da água, incluindo aumento significativo na demanda de água para irrigação, encurtamento dos ciclos vegetativos, aumento de pragas e espécies exóticas, aumento do risco de ondas de calor ou inundações, repercussões diretas na produção agrícola ou impactos na qualidade dos produtos (FÜSSEL e JOL, 2012). Além disso, os serviços ambientais e territoriais derivados da agricultura e o valor paisagístico dos sistemas agrícolas podem ser afetados também se ocorrer um abandono significativo de terras agrícolas (VARGAS-AMELIN E PINDADO, 2014).

Sanghi e Mendelsohn (2008), em uma simulação para avaliar os possíveis impactos de mudanças climáticas em regiões menos desenvolvidas, mostraram que, mantidas as condições atuais e abstraindo o progresso tecnológico e possíveis ações de adaptação por parte dos agricultores, um ambiente mais quente e com maior precipitação pode levar a perdas importantes na agricultura dessas regiões. Para o caso brasileiro, por exemplo, esses autores estimam que um aumento de 2°C na temperatura média e de 8% na precipitação média pode levar a perdas de 20% na renda líquida do setor agrícola.

Ainda, as alterações climáticas podem ter um grande impacto no ciclo global da água, modificando os processos hidrológicos presentes neste ciclo (LUDWIG, VAN SLOBBE e COFINO, 2014). Temperaturas mais altas levam a uma maior evaporação potencial das águas superficiais, aumentando assim o potencial de secagem da superfície e aumentando a quantidade de umidade no ar. Eventos de precipitação mais intensos são esperados, já que o ar mais quente pode conter mais umidade (TRENBERTH, 2011). Aumentos significativos são esperados em latitudes mais altas e decréscimos nos sub-tropicais. O aquecimento também afeta a circulação atmosférica que resulta na mudança dos padrões de precipitação (SIMONOVIC, 2017).

De acordo com Simonovic (2017), eventos extremos relacionados à água podem ter impactos positivos e negativos. Eles servem para recarga de ecossistemas naturais e produção de alimentos, mas podem afetar negativamente a saúde, saneamento, destruir propriedades e causar perda de vidas. O IPCC (2013) afirma que as inundações irão aumentar em climas futuros. No entanto, existe uma incerteza considerável na natureza exata de como isso evoluirá (SIMONOVIC e LI, 2004). Nos países em desenvolvimento, as inundações extremas podem resultar em perda de vida, enquanto nos países desenvolvidos causam grandes danos materiais.

Além disso, as mudanças na precipitação, temperatura e evapotranspiração potencial e seus efeitos combinados estão influenciando a ocorrência e a severidade das secas. Tal como no caso das inundações, é difícil separar os impactos das alterações climáticas das atividades humanas (efeitos de engenharia e mudanças no uso da terra) e da variabilidade climática a longo prazo. Nas últimas três décadas, as secas tornaram-se mais disseminadas, mais intensas e mais persistentes devido à diminuição da precipitação sobre a terra e o aumento das temperaturas (IPCC, 2013).

No 3º Relatório Mundial de Avaliação da Água (WWAP, 2009) e também relatado por Cosgrove e Cosgrove (2012), os impactos das mudanças climáticas nos recursos hídricos podem ser resumidos da seguinte forma: (i) redução do abastecimento de água devido a mudanças temporais que as temperaturas mais altas têm sobre os geleiras, campos de gelo, rios e lagos; (ii) aumento na frequência e magnitude dos eventos de inundação e seca devido a mudanças generalizadas na distribuição da precipitação e mudanças sazonais na vazão; (iii) danos às áreas costeiras pela elevação do nível do mar e a salinização relacionada de aquíferos costeiros; (iv) aumento no uso de água de irrigação; (v) diminuição na qualidade de todas as fontes de água doce devido a temperaturas mais altas e mudanças no fluxo; e (vi) aumento dos requisitos funcionais e operacionais para a infraestrutura de água existente (abastecimento de água municipal, energia hidrelétrica, defesas estruturais contra inundações e sistemas de drenagem e irrigação).

3 Material e Métodos

3.1. Contextualização e importância da área de estudo

Segundo a Lei nº 10.350/1994, que regulamentou o artigo 171 da Constituição Estadual, foi estabelecida, para cada bacia do estado do Rio Grande do Sul, a formação de um comitê de gerenciamento, denominado de comitê de bacia. De acordo com a referida lei, para o estado foram definidas três regiões hidrográficas: rio Uruguai, Guaíba e Litoral. Cada região hidrográfica foi subdividida em bacias hidrográficas, totalizando 25 unidades.

A BHMSG, apresentada na Figura 1, faz parte da região hidrográfica do Atlântico Sul. Por ter suas águas provenientes também do Uruguai, é uma bacia transfronteiriça e possui área de drenagem de aproximadamente 62.250 km², na qual 47% está localizada em território brasileiro (STEINMETZ et al., 2018).

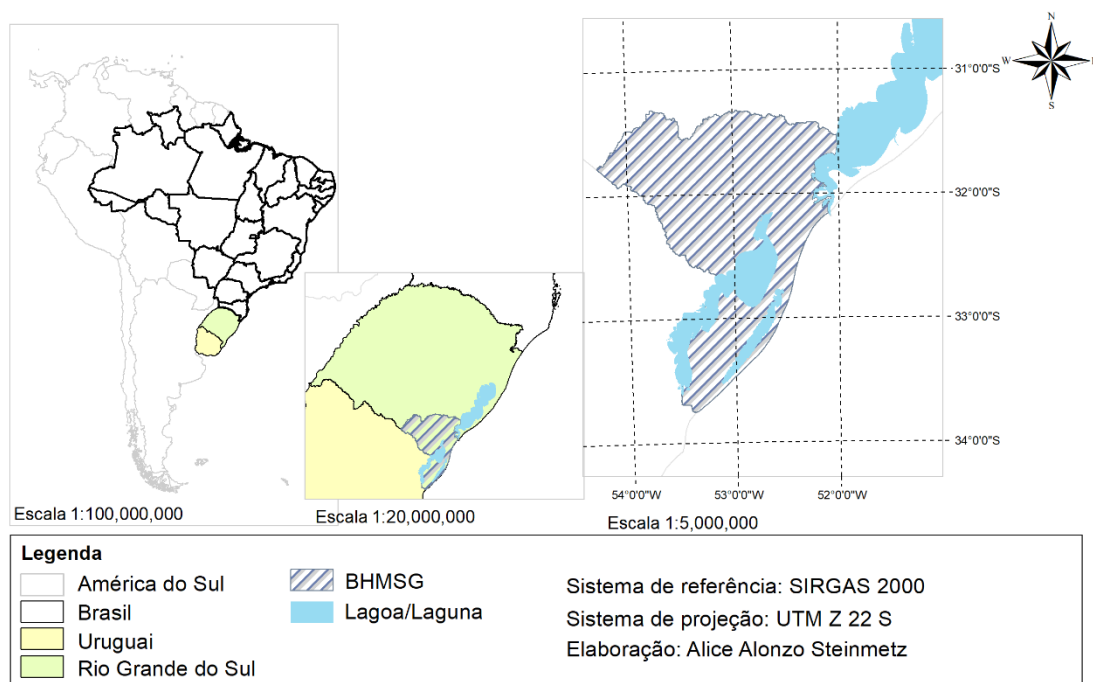


Figura 1 – Localização geográfica (em escala de continente, país e estado) da bacia hidrográfica Mirim-São Gonçalo do lado brasileiro.

A produção de arroz irrigado destaca-se como a principal atividade agrícola no território brasileiro da BHMSG (OLIVEIRA et al., 2014), desempenhando um papel importante nos setores econômico e social, seguido pela soja, trigo e milho

(AZAMBUJA, 2005). Além disso, também contém áreas de preservação de sistemas ecológicos, como a Estação Ecológica do Taim, que é reconhecida pela Organização Educacional Científica e Cultural das Nações Unidas (UNESCO) como Reserva da Biosfera (STEINMETZ et al., 2018).

Como a água de seus cursos são utilizados na agricultura, abastecimento público e transporte, a BHMSG desempenha um papel econômico fundamental no sul do estado do Rio Grande do Sul (BESKOW et al., 2016). Como resultado da exploração intensa, grandes quantidades de resíduos agrícolas e residenciais são transportadas para a BHMSG (FRIEDRICH, NIENCHESKI e SANTOS, 2006; GRÜTZMACHER et al., 2008), principalmente a partir de arroz irrigado e da cidade de Pelotas (HILLMAN et al., 2007). Além disso, segundo o Atlas Brasileiro de Desastres Naturais (CEPED, 2013), alguns municípios, pertencentes a BHMSG, dispõem de alta incidência de desastres naturais devido a inundações, como, entre outros, os municípios de Arroio Grande, Jaguarão e Pelotas.

As sub-bacias analisadas neste estudo integram a BHMSG e estão localizadas inteiramente no estado do Rio Grande do Sul, sendo elas: bacia hidrográfica do arroio Pelotas (BHAP), bacia hidrográfica do arroio Fragata (BHAF) e bacia hidrográfica do rio Piratini (BHRP), apresentadas na Figura 2. Por possuírem série histórica de dados de vazão, obtida por meio de estações fluviométricas mantidas pela Agência Nacional de Águas (ANA), a área de estudo das bacias hidrográficas foi escolhida à montante dessas seções de controle, são elas: seção de controle “Passo dos Carros”, “Ponte Cordeiro de Farias” e “Pedro Osório” referentes à BHAF, BHAP e BHRP, respectivamente.

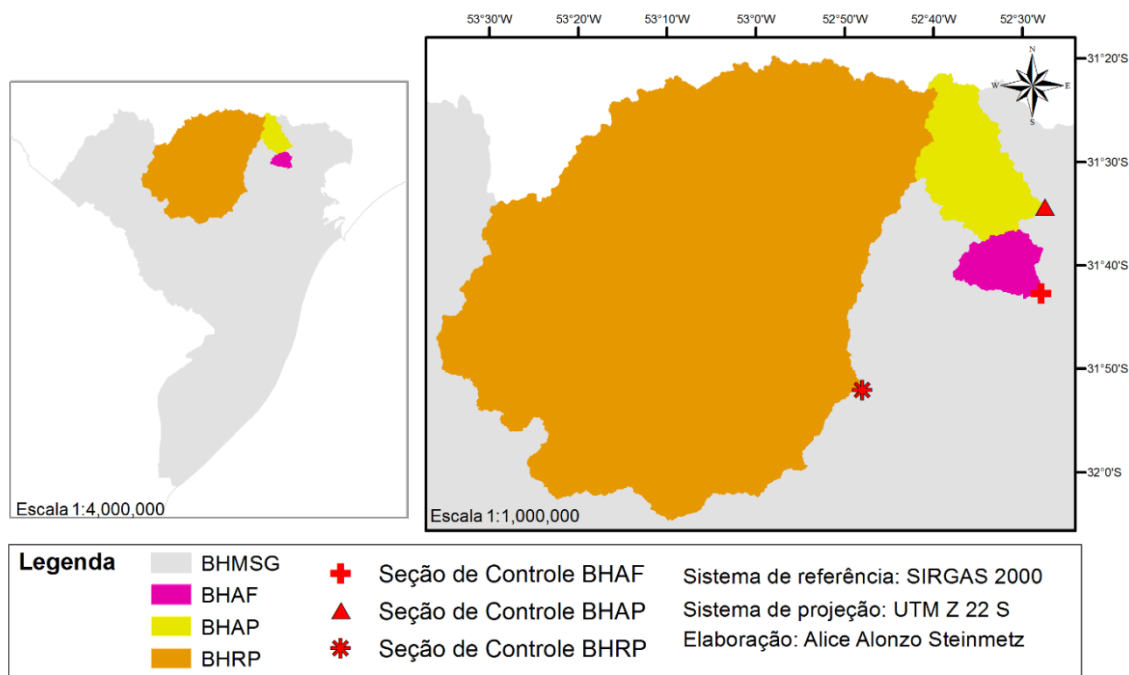


Figura 2 – Delimitação e localização na bacia hidrográfica Mirim-São Gonçalo (lado brasileiro) das bacias hidrográficas do arroio Pelotas (BHAP), do arroio Fragata (BHAF) e do rio Piratini (BHRP), bem como suas seções de controle.

3.2. SWAT

O SWAT, modelo escolhido para a simulação hidrológica, é um modelo conceitual semi-distribuído e que pode prever o efeito de decisões de manejo sobre a produção de água, com precisão considerável para bacias hidrográficas (ARNOLD et al., 1998; NEITSCH et al., 2011). Os dados de entrada necessários para a simulação hidrológica no modelo SWAT compreendem base de dados hidrológicos (precipitação e vazão), meteorológicos (temperatura máxima, temperatura mínima, umidade relativa, radiação solar e velocidade do vento) e base de dados espacial (modelo digital de elevação, mapa de classes de solo e mapa de classes de uso do solo).

3.2.1. Base de dados hidrológicos e meteorológicos

As séries de precipitação, temperatura mínima, temperatura máxima, velocidade média do vento, umidade relativa média e radiação solar foram obtidas junto à Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) e ao Banco de

Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) do INMET, coletadas nas referidas estações meteorológicas com intervalo de tempo diário.

A rede de monitoramento de precipitação foi complementada por estações de monitoramento de responsabilidade da ANA, cujas séries históricas diárias foram obtidas na plataforma HidroWeb – Sistema de Informações Hidrológicas (ANA, 2017), da mesma forma que as séries de vazão. As informações referentes às estações meteorológicas, pluviométricas e fluviométricas empregadas podem ser visualizadas na Tabela 1 e a localização das estações está disposta na Figura 3.

Tabela 1 - Informações das estações meteorológicas (M), pluviométricas (P) e fluviométricas (F) empregadas

Nome	Responsável	Código	Tipo de estação	Latitude	Longitude	Altitude (m)
Ponte Cordeiro de Farias	ANA	88850000	F	-31.57	-52.46	40
Passo dos Carros	ANA	88750000	F	-31.71	-52.48	10
Pedro Osório	ANA	88641000	F	-31.86	-52.82	17
Sede	EMBRAPA	1	M/P	-31.70	-52.40	20
Cascata	EMBRAPA	2	M/P	-31.47	-52.51	169
Est. Agro-meteorológica de Pelotas	INMET EMBRAPA UFPEl	83895	M/P	-31.61	-52.41	14
Ponte Cordeiro de Farias	ANA	3152016	P	-31.57	-52.46	40
Canguçu	ANA	3152003	P	-31.40	-52.67	400
Passo da Capela	ANA	3153006	P	-31.13	-53.05	120
Estação Experimental do Piratini	ANA	3153021	P	-31.43	-53.11	340
Pinheiro Machado	ANA	3153008	P	-31.58	-53.48	440
Pedras Altas	ANA	3153007	P	-31.73	-53.59	380
Ferraria	ANA	3153004	P	-31.74	-53.05	200
Herval	ANA	3253004	P	-32.03	-53.40	260
Vila Freire	ANA	3152005	P	-31.67	-52.77	250
Arroio Grande	ANA	3253001	P	-32.24	-53.09	3

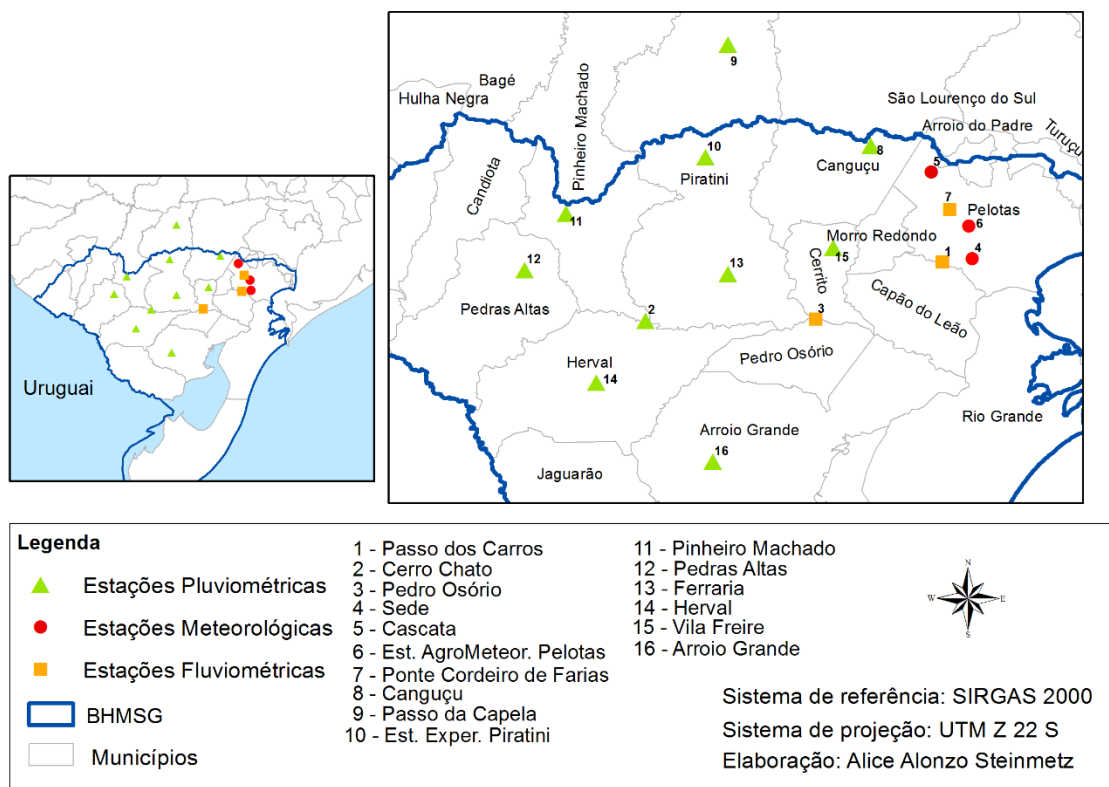


Figura 3 – Localização das estações meteorológicas, pluviométricas e fluviométricas empregadas.

Os arquivos obtidos junto à plataforma HidroWeb, BDMEP/INMET e EMBRAPA, contendo dados de chuva e de vazão, foram organizados com o intuito de definir um período em comum para a modelagem nas bacias hidrográficas (1994-2005), devido aos períodos de registros de dados nas estações serem bastante divergentes.

3.2.2. Base de dados espacial

Para a base de dados espacial requerida pelo modelo SWAT, são necessários os mapas de MDE, classes de solo e classes de uso do solo. O MDE (Figura 4) foi obtido a partir do *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM), com resolução espacial de 30 m, disponibilizado pelo INPE (FARR et al., 2007). A partir deste MDE, definiu-se o MDE Hidrológicamente Consistente (MDE-HC), no ambiente do SIG ArcGIS 10.5, empregando a ferramenta “Fill” para preenchimento de depressões espúrias. No SWAT, o mapa de declividade é gerado a partir do MDE, o qual foi reclassificado com base nos padrões de declividade proposto por EMBRAPA (2014) (Figura 5): Relevo plano (0-3%), suave-plano (3-8%), ondulado

(8-20%), forte ondulado (20-45%), montanhoso (45-75%) e forte-montanhoso (>75%).

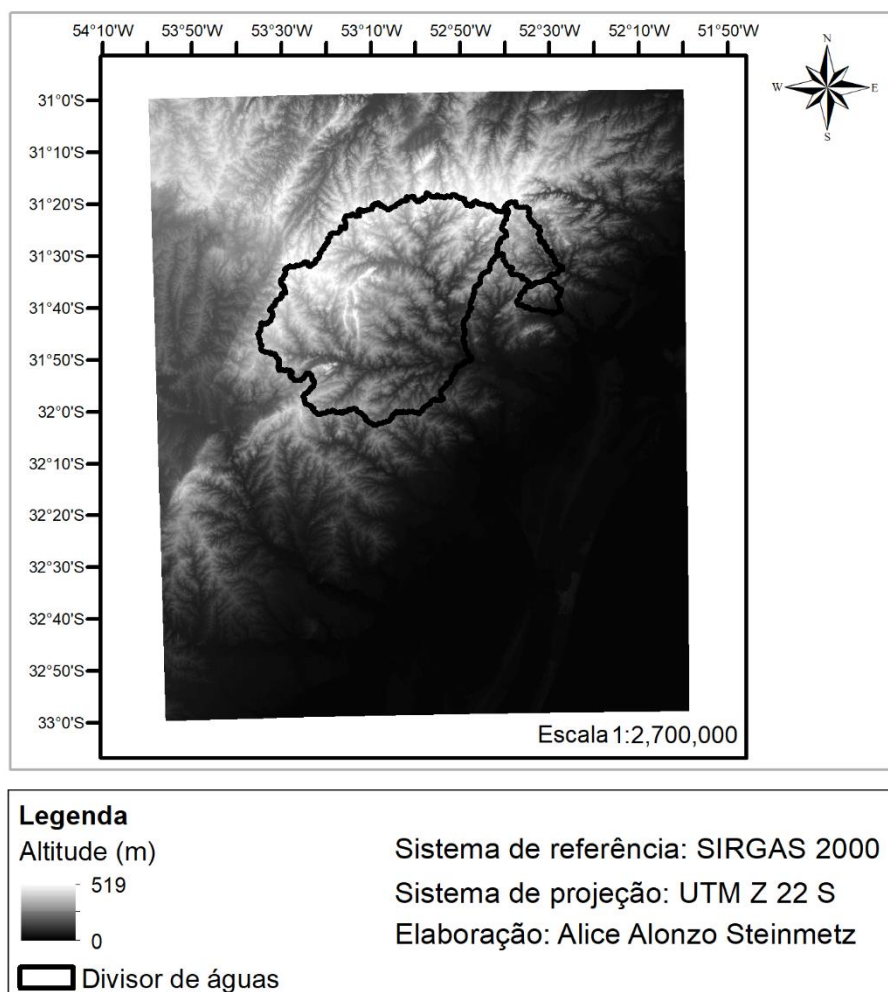


Figura 4 – Modelo digital de elevação utilizado no processamento das bases de dados espaciais contemplando a área de drenagem de cada uma das sub-bacias analisadas.

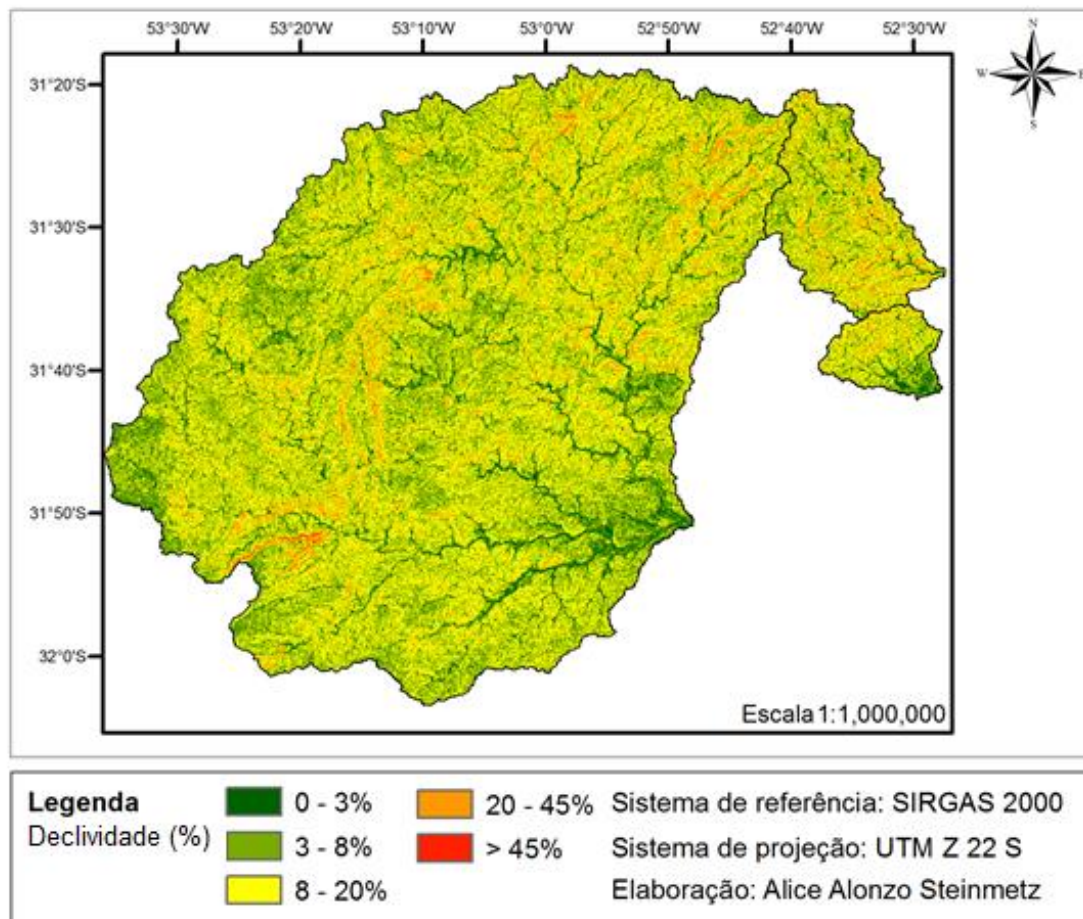


Figura 5 – Mapa de declividade gerado a partir do processamento no ArcSWAT para as bacias em estudo utilizando as classes de declividade propostas por EMBRAPA (2014).

Para as de classes de uso do solo foi elaborado um mapa de classes de uso e cobertura do solo (Figura 6) advindas da interpretação de uma imagem de satélite registrada no ano de 1999, haja vista que este ano pertence ao intervalo de anos escolhidos para a calibração do modelo (1995 – 2000). Esta imagem corresponde à órbita 222/82 do sensor ETM+ – *Enhanced Thematic Mapper Plus* (Landsat 7) e foi obtida gratuitamente junto ao INPE. A imagem foi interpretada utilizando classificação supervisionada, através do método da Máxima Verossimilhança. As áreas foram estabelecidas considerando os pixels com comportamento espectrais próximos ou iguais. Para tal intento, empregou-se o software *Environment for Visualizing Images* (ENVI), seguindo recomendações de Richards (2013).

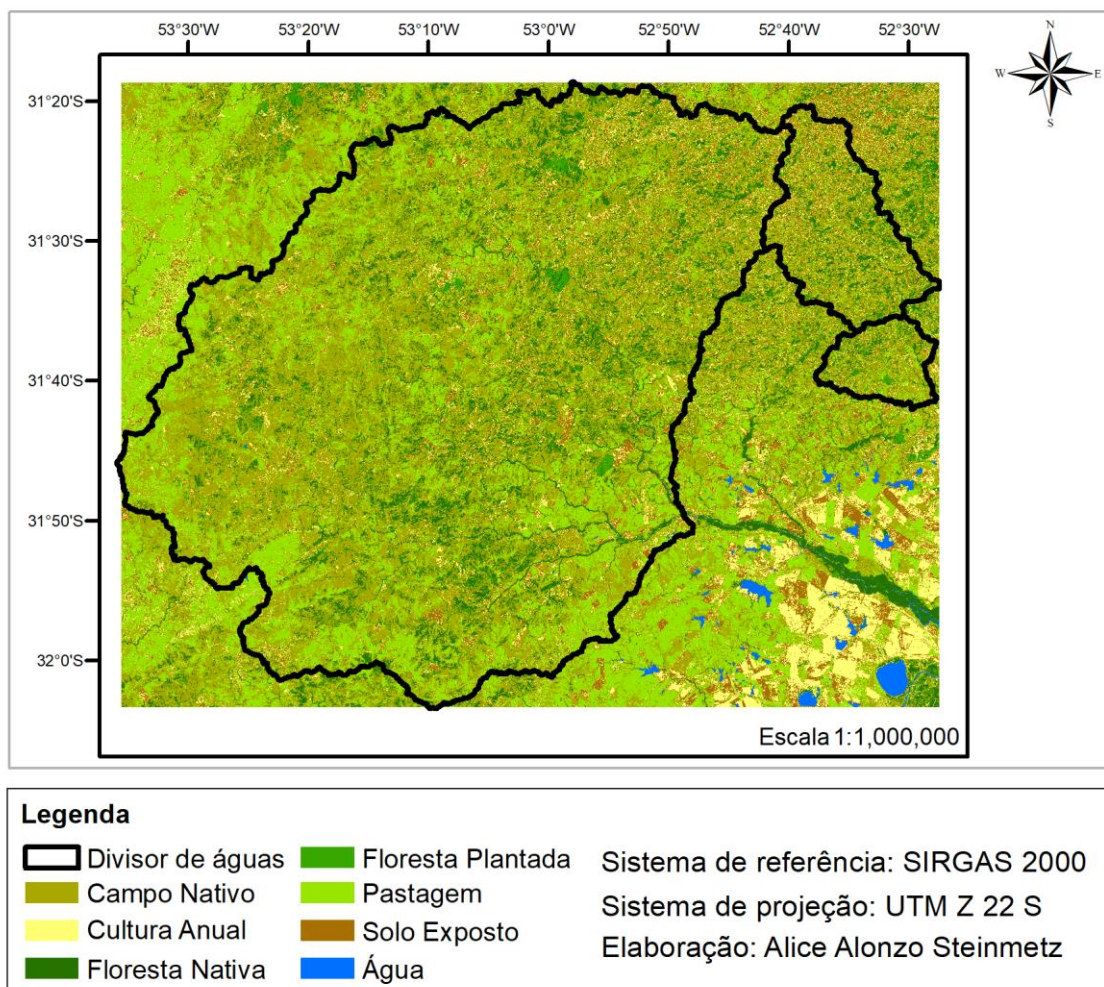


Figura 6 – Mapa de usos do solo empregado no processamento das bases de dados espaciais contemplando a área de drenagem de cada uma das sub-bacias analisadas.

O enquadramento das classes de uso do solo (Figura 6) procedeu-se em: A classe “Cultura anual” compreende às áreas agrícolas utilizadas para cultivo. As classes “Floresta nativa” e “Campo nativo” corresponde a vegetações nativas de grande porte e pequeno porte, respectivamente. A classe “Floresta plantada” refere-se a florestas de eucalipto e áreas de reflorestamento. A classe “Pastagem” remete à vegetação destinada para alimentar o gado. E as estradas de terra e áreas dentro de regiões de cultivo onde não há vegetação foram classificadas como “Solo exposto”.

A variação espacial dos solos na área de estudo (Figura 7) foi extraída do Mapa de Solos da Região do Conselho Regional de Desenvolvimento da Região Sul (COREDE-SUL). Este mapa, em formato “shapefile”, foi elaborado pelo

Laboratório de Planejamento Ambiental da EMBRAPA, tomando como base os estudos realizados por Cunha, Silveira e Severo (2006).

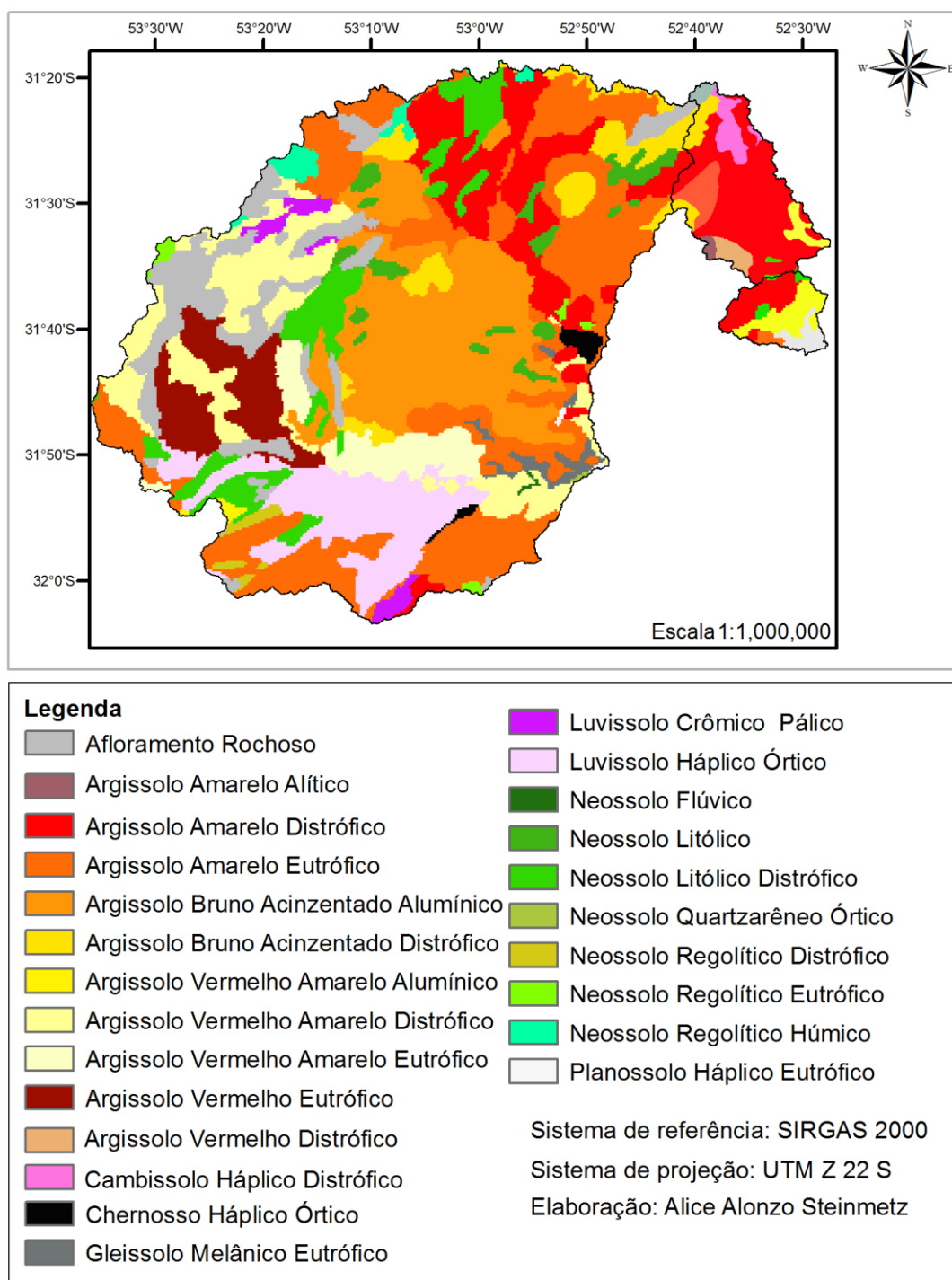


Figura 7 – Mapa de solos utilizado no processamento das bases de dados espaciais das bacias hidrográficas no SWAT extraída do Mapa de Solos da Região do Conselho Regional de Desenvolvimento da Região Sul (COREDE-SUL) (Cunha, Silveira e Severo, 2006).

3.2.3. Processamentos iniciais no SWAT

A versão SIG do SWAT, ArcSWAT (versão 2012.10.19) (TEXAS A&M, 2012) foi aplicada em ambiente ArcGIS 10.1. O MDE (Figura 4) foi inserido no ArcSWAT e as bacias hidrográficas foram delimitadas automaticamente através da ferramenta “*Automatic Watershed Delineation*”, presente no ArcSWAT a partir da inserção das seções de controle. O propósito de utilizar o ArcSWAT é compilar todos os dados de entrada e informações geradas a partir da inserção dos mesmos para a próxima etapa (calibração).

Devido à disponibilidade de séries históricas de vazão derivadas de monitoramento pela ANA na “Ponte Cordeiro de Farias”, no “Passo dos Carros” e em uma ponte em “Pedro Osório”, estas foram consideradas como seções de controle a fim de proceder a delimitação das bacias hidrográficas. É importante salientar que cada bacia hidrográfica em estudo teve o seu projeto desenvolvido de modo isolado, ou seja, esses procedimentos foram feitos para cada bacia separadamente.

Como o SWAT utiliza dois tipos de unidades funcionais (sub-bacia e HRU), com base no mapa de direções de fluxo derivado do MDE, as bacias hidrográficas foram divididas em sub-bacias. Em seguida, foram extraídos dados de entrada de cada banco de dados dessas sub-bacias para delinear os HRUs, que possuem combinações únicas para cada sub-bacia. Concomitantemente, foram inseridos os mapas de classes e usos do solo para a elaboração desses mapas para cada bacia hidrográfica, bem como o mapa de declividade das mesmas; os dados climáticos de cada estação meteorológica e de precipitação e; os parâmetros dos componentes de cada solo considerado.

3.2.4. Calibração e validação do modelo

A modelagem hidrológica nas bacias hidrográficas foi conduzida empregando os intervalos de tempo diário e mensal para as séries históricas observadas nas seções de controle “Passo dos Carros” (BHAF) e “Ponte Cordeiro de Farias” (BHAP) entre 1994 a 2005. O primeiro ano foi utilizado para aquecimento do modelo, o período de 1995 a 2000 para calibração e o período de 2001 a 2005

para validação. Já para a BHRP, foram empregados os dados da seção de controle “Pedro Osório”, no período de 2007 a 2016, sendo o primeiro ano utilizado para aquecimento do modelo, 2008 a 2012 e 2013 a 2016 para calibração e validação, respectivamente. A escolha de diferentes períodos de calibração e validação para a BHRP ocorreu devido à estação fluviométrica, localizada na seção de controle desta bacia, somente apresentar série histórica sem falhas significativas a partir de 2007.

A calibração e a análise de incerteza para o SWAT foram realizadas no SWAT-CUP (ABBASPOUR, 2013) e o algoritmo aplicado foi o SUFI-2 (ABBASPOUR, JOHNSON e VAN GENUCHTEN, 2004), como em Teklay et al. (2019). Segundo Rouholahnejad et al. (2012), o SUFI-2 utiliza o método do hipercubo latino para definição dos parâmetros e o processo inicia com uma faixa de valores determinada pelo usuário. Cada valor de parâmetro selecionado é substituído dentro do projeto do SWAT, sendo esse processo é realizado quantas vezes o usuário achar necessário. Para calibrar o modelo, foram escolhidos 20 parâmetros, conforme Oliveira et al. (2017), que exercem influência na vazão. A calibração foi feita de forma semi-automática para o passo de tempo diário e também considerando o passo de tempo mensal e a função objetivo utilizada foi o NS.

3.2.5. Análise de desempenho

Para verificar o desempenho do SWAT nos períodos de calibração e validação foram utilizados o coeficiente de Nash e Sutcliffe (NS) (NASH e SUTCLIFFE, 1970) (Equação 2), sua versão para valores logaritmizados (NSlog) (Equação 3) e o erro percentual (PBIAS) (Equação 4):

$$NS = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs_i} - Q_{est_i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs_i} - \bar{Q}_{obs})^2} \right] \quad (2)$$

$$NSlog = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\log(Q_{obs_i}) - \log(Q_{est_i}))^2}{\sum_{i=1}^n (\log(Q_{obs_i}) - (\log \bar{Q}_{obs}))^2} \quad (3)$$

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs_i} - Q_{est_i})}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs_i})} \right] \times 100 \quad (4)$$

Onde, Q_{obs} , Q_{est} e $\bar{Q}$ são as vazões observadas, estimadas e médias, respectivamente.

Quanto ao NS e NSlog, o presente estudo adotou a recomendação proposta por Moriasi et al. (2015), os quais sugeriram que um hidrograma estimado com $NS \leq 0,50$ seja classificado como insatisfatório; $0,50 < NS \leq 0,70$, satisfatório; $0,70 < NS \leq 0,80$, bom e; $NS > 0,80$, muito bom. O NS reflete a eficiência do modelo para estimativas mais acertadas em períodos de cheias, enquanto que o NSlog possibilita verificar a capacidade do modelo em estimar vazões durante o período de estiagem (BESKOW et al., 2009).

O desempenho do modelo levando em conta o PBIAS também foi avaliado com base nas recomendações de Moriasi et al. (2015), onde: $|PBIAS| < 5\%$ foi considerado muito bom; $5\% \leq |PBIAS| < 10\%$ bom; $10\% \leq |PBIAS| < 15\%$ satisfatório e $|PBIAS| \geq 15\%$ insatisfatório. O PBIAS permite analisar se o modelo super ou subestima as estimativas em relação aos valores observados, sendo que valores negativos refletem superestimativa, enquanto valores positivos refletem subestimativa.

3.3. Projeções climáticas e análise de tendência

As projeções do clima futuro para as bacias em estudo foram obtidas junto à plataforma PROJETA – Projeções de Mudanças do Clima para a América do Sul Regionalizados pelo Modelo Eta. O PROJETA é um projeto do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), do INPE, que disponibiliza diversas variáveis meteorológicas geradas por redução de escala (downscaling) pelo MCR Eta para diferentes MCG's.

As informações climáticas para projeções futuras foram derivadas dos MCG's BESM, CANESM2, HADGEM2 e MIROC5 (Tabela 2), regionalizadas pelo modelo ETA. O modelo regional ETA foi adaptado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (INPE/CPTEC) para simular integrações climáticas de longo prazo sobre as Américas Central e do Sul. As equações deste modelo são discretizadas na grade E de Arakawa, onde a distância entre dois pontos adjacentes de massa ou de vento define a resolução da grade. A dinâmica do modelo é desenvolvida na coordenada

vertical η), as superfícies desta coordenada são aproximadamente horizontais, o que reduz os erros nos cálculos obtidos com base em derivadas horizontais (BLACK, 1994).

Tabela 2 - Modelos Climáticos Globais (MCG's), com ênfase na referência e na forma com que consideram o ano civil, em número de dias, para suas simulações

Modelo Climático Global	Referência*	País	Dias no ano
BESM – <i>Brazilian Earth System Model</i> versão 2.3.1	Nobre et al. (2013)	Brasil	365 ou 366
CANESM2 – <i>Canadian Earth System Model</i> segunda geração	Arora et al. (2011)	Canadá	365
HADGEM2 – <i>Hadley Centre Global Environmental Model</i> versão 2	Collins et al. (2011)	Inglaterra	360
MIROC5 – <i>Model for Interdisciplinary Research on Climate</i> versão 5	Watanabe et al. (2010)	Japão	365

Tais informações são disponibilizadas na plataforma PROJETA para o clima passado (CP), o qual compreende 01 de janeiro de 1961 à 31 de dezembro de 2005, e para as projeções futuras dos RCPs 4.5 e 8.5, de 01 de janeiro de 2006 à 31 de dezembro de 2099. Neste estudo, foram utilizados os dados históricos diários (CP) corrigidos de 1965 a 2005 e quanto às projeções futuras, foram empregados dados diários corrigidos para o período completo (2006 – 2099), tendo sido este período dividido em três períodos futuros (P1, P2 e P3), 2006 a 2040, 2041 a 2070 e 2071 a 2099, respectivamente, utilizando os RCPs 4.5 e 8.5. E, as variáveis utilizadas foram as seguintes: precipitação total (PREC), temperatura máxima do ar a 2m da superfície (MXTP), temperatura mínima do ar a 2m da superfície (MNTP), umidade relativa do ar a 2m da superfície (UR2M), intensidade do vento a 10m da superfície (W10M), radiação de onda curta incidente à superfície (OCIS).

Essas variáveis foram adquiridas para uma grade com 42 pontos (Figura 8), com base em Caldeira (2019), que contemplam as bacias de interesse e, para analisar as séries oriundas das projeções, as variáveis foram analisadas em cada um dos pontos da grade.

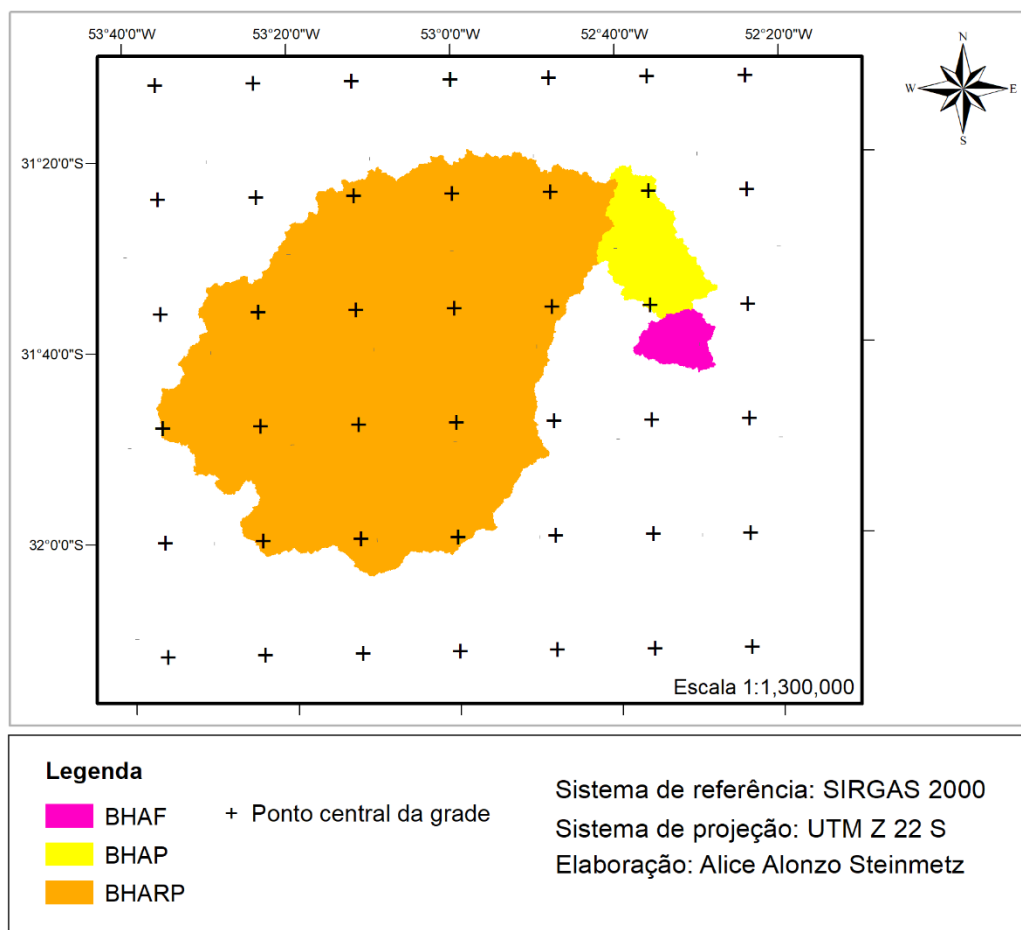


Figura 8 – Pontos da grade dos modelos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-HADGEM2 e ETA-MIROC5 sobre a área de estudo, compreendida pela bacia hidrográfica do arroio Fragata (BHAF), bacia hidrográfica do arroio Pelotas (BHAP) e pela bacia hidrográfica do rio Piratini (BHARP).

O presente estudo também buscou avaliar se as projeções dos MCG's regionalizadas pelo modelo Eta expressam tendências monotônicas de mudanças climáticas sobre a área de estudo e ao longo do período analisado. A análise de tendência utilizada foi a conduzida por Caldeira (2019), a qual utilizou o teste estatístico não-paramétrico de Mann-Kendall (MANN, 1945; KENDALL, 1975) sobre as séries de precipitação total anual e temperatura média diária anual, obtidas por meio dos dados diários outrora mencionados, para cada ponto central da grade (Figura 8), e para o clima passado e cenários futuros sobre os RCP's 4.5 e 8.5.

Os resultados obtidos no teste de Mann-Kendall para o p-valor foram avaliados ao nível de significância α de 0,05 (ou 5%), tendo sido constatada tendência toda vez que p-valor fosse inferior à α . Para determinar se a tendência era de aumento ou diminuição dos valores das variáveis ao longo do tempo,

empregou-se os resultados do teste de Mann-Kendall para a estatística S e $\text{Var}(S)$ e Z (Equação 6).

$$Z = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{se } S > 0 \\ 0 & \text{se } S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{se } S < 0 \end{cases}$$

Os resultados obtidos junto ao teste de Mann-Kendall, na análise de tendência da precipitação total anual a partir de dados do clima passado e de projeções futuras dos MCG's BESM, CANESM2, HadGEM2-ES e MIROC5 regionalizados pelo MCR Eta para os RCP's 4.5 e 8.5 podem ser visualizados no Apêndice A.

O teste de Mann-Kendall também foi aplicado para verificar se os aumentos e diminuições ao longo do tempo das vazões médias anuais simuladas pelo modelo SWAT forçado pelos modelos climáticos são significativas ou não, foi feita a análise de tendência da vazão média anual obtida junto ao teste de Mann-Kendall, para todo o período e para os três períodos futuros (P1, P2 e P3).

3.4. Avaliação do escoamento simulado para o clima passado

Os hidrogramas obtidos pelo SWAT uma vez forçadas a partir dos dados climáticos futuros originados dos MCG's ETA-BESM, ETA-HADGEM2, ETA-CANESM2 e ETA-MIROC5 e regionalizadas pelo modelo Eta para o CP (1965 a 2005), foram utilizados para determinar baselines ou condições de referência para a BHAF e BHAP, em termos de estimativa do escoamento, visando à análise de indicadores hidrológicos. Para isso, o SWAT, calibrado e validado para as bacias hidrográficas no período de 1994 a 2005, foi forçado com os dados dessas projeções climáticas para o período de 1965 a 2005. Esta avaliação foi possível para a BHAF e para a BHAP, visto que estas bacias apresentam dados observados desde meados do ano de 1964, dessa forma, abrangendo o período CP considerado neste estudo. Para a BHRP esta análise não foi permitida, visto que a bacia apresenta dados observados apenas a partir do ano de 2007, ou seja, fora do período de CP considerado.

Para a avaliação do hidrograma simulado pelo modelo hidrológico SWAT forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HADGEM2, considerando o CP, foi feita a comparação entre: as vazões médias mensais estimadas pelo modelo hidrológico SWAT forçado pelos modelos climáticos, a média aritmética das vazões médias mensais estimada pelos modelos climáticos (*Ensemble Mean*) e as vazões médias observadas nas seções de controle de cada bacia hidrográfica (BHAF e BHAP). Os erros nas estimativas das vazões médias mensais foram avaliados segundo o PBIAS (Equação 4).

Adicionalmente à análise das vazões médias mensais simuladas pelo modelo hidrológico forçado pelos modelos climáticos versus as vazões observadas nas seções de controle das bacias e com o intuito de melhor embasar a discussão, também foram avaliadas as precipitações médias mensais simuladas pelos modelos climáticos, bem como as precipitações médias observadas na estação de monitoramento de chuva “Ponte Cordeiro de Farias”, considerando o CP. Apesar de se localizar na seção de controle da BHAP, esta estação também possui área de influência na BHAF devido a sua proximidade.

Visando estabelecer vazões de referência na BHAF e na BHAP, as curvas de permanência, considerando o CP, foram construídas considerando a vazão média mensal observada em cada seção de controle e a vazão média simulada pelo modelo hidrológico SWAT forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HADGEM2. De forma complementar, as vazões de referência foram divididas em intervalos conforme proposto por Gudmundsson et al. (2012): $<Q_{5\%}$, vazões altas; $Q_5 - Q_{25\%}$, vazões moderadamente altas; $Q_{25} - Q_{50\%}$, vazões normais altas; $Q_{50} - Q_{75\%}$, vazões normais baixas; $Q_{75} - Q_{95\%}$, vazões moderadamente baixas e; $\geq Q_{95\%}$, vazões baixas. O desempenho do modelo hidrológico forçado pelos modelos climáticos nos intervalos foi avaliado com base no coeficiente de correlação (R) (Equação 7) e do PBIAS (Equação 4).

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs_i} - \bar{Q}_{obs_i})(Q_{est_i} - \bar{Q}_{est_i})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{obs_i} - \bar{Q}_{obs_i})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{est_i} - \bar{Q}_{est_i})^2}} \quad (7)$$

3.5. Impacto das mudanças climáticas sobre os indicadores hidrológicos

A avaliação dos possíveis impactos decorrentes das mudanças climáticas sobre as vazões das bacias foi realizada levando em consideração o hidrograma simulado pelo modelo SWAT a partir das simulações do CP, baselines e das projeções futuras. As análises a serem realizadas seguiram o estudo de Viola (2011), o qual comparou a condições de referência com dados de vazão observados na seção de controle da bacia, dentre essas análises estão: os indicadores de vazões máximas, médias e mínimas anuais, médias mensais, curvas de permanência e produção de água. Além disso, a discussão do trabalho se baseou nos seguintes estudos:

Caldeira (2019) avaliou o impacto das mudanças climáticas sobre a hidrologia das mesmas bacias utilizadas no presente estudo sob a aplicação de um modelo hidrológico distinto: o modelo hidrológico *Lavras Simulation of Hydrology* (LASH). O LASH foi calibrado e validado para cada sub-bacia ao passo de tempo diário e forçado com dados meteorológicos diários do clima passado modelado (1961 a 2005) e de projeções futuras (2006 a 2099) para RCP 4.5 e RCP 8.5 de quatro modelos climáticos globais regionalizados pelo modelo climático regional ETA: BESM, CANESM2, HADGEM2 e MIROC5.

Chou et al. (2014) avaliaram as mudanças climáticas na América do Sul com base nas simulações do ETA-HADGEM2 e do ETA-MIROC5 para o RCP 4.5 e o RCP 8.5. As mudanças foram analisadas para três períodos: 2011-2040; 2041-2070 e 2071-2100. Neto et al. (2016) avaliaram os impactos dos cenários de mudança climática do AR5 nos recursos hídricos e nos processos hidrológicos em todo o território brasileiro utilizando o modelo hidrológico MGB-IPH forçado pelo ETA-HADGEM2 e ETA-MIROC5 para três períodos (2011-2040, 2041-2070 e 2071-2099). Essas projeções adotaram dois cenários de emissão (RCP 4.5 e RCP 8.5) e as simulações mostraram a resposta das regiões hidrográficas devido à mudança de precipitação e evapotranspiração potencial nos cenários.

Alvarenga et al. (2018) estudaram os impactos das mudanças climáticas futuras na vazão média sazonal e na disponibilidade mensal de água em uma pequena bacia hidrográfica (6.76 km²) localizada na bacia do rio Grande, em Minas Gerais, Brasil. A avaliação foi realizada utilizando o modelo hidrológico *Distributed*

Hydrology-Soil-Vegetation Model (DHSVM) forçado pelo ETA-HADGEM2 para o RCP 4.5 e RCP 8.5 para o baseline (1961 a 1990) e para três períodos futuros (2011-2040, 2041-2070 e 2071-2099). Os resultados mostraram diferenças no comportamento hidrológico entre os cenários de emissão e os intervalos de tempo.

Oliveira et al. (2019) analisaram os impactos das mudanças climáticas sobre a vazão e as cargas de sedimentos na bacia do Alto Paranaíba (3754 km²), sudeste do Brasil. O modelo SWAT foi aplicado para estimar a vazão e as cargas de sedimentos nas condições observadas e quantificar possíveis impactos das mudanças climáticas de quatro modelos climáticos: ETA-BESM, ETA-MIROC5, ETA-CANESM2 e ETA-HADGEM2 para dois RCPs (4.5 e 8.5).

4 Resultados e Discussão

4.1. Compilação da bases de dados no SWAT

A compilação das informações que relacionam as bacias com as classes de usos do solo, classe de solos e declividade, estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Compilação dos resultados com relação ao uso do solo, tipo de solo e declividade para a bacia hidrográfica do arroio Fragata (BHAF), bacia hidrográfica do arroio Pelotas e para a bacia hidrográfica do rio Piratini (BHRP)

		BHAF		BHAP		BHRP	
		Área (km²)	% Área	Área (km²)	% Área	Área (km²)	% Área
		129,4		369,8		4701,3	
Uso do Solo	Água	0,12	0,09	0,16	0,04	2,51	0,05
	Cultura Anual	10,80	8,35	44,08	11,92	247,84	5,27
	Floresta Nativa	18,66	14,42	63,08	17,06	599,06	12,74
	Campo Nativo	60,81	47,00	168,31	45,52	2409,06	51,24
	Floresta Plantada	7,83	6,06	22,74	6,15	210,11	4,47
	Pastagem	20,14	15,56	24,92	6,74	1005,75	21,39
	Solo Exposto	11,03	8,53	46,487	12,57	226,92	4,83
Solo	Afloramento Rochoso	-	-	7,58	2,05	379,04	8,06
	Argissolo Amarelo Alítico	-	-	5,59	1,51	-	-
	Argissolo Amarelo Distrófico	50,16	38,76	228,94	61,91	430,50	9,16
	Argissolo Amarelo Eutrófico	6,24	4,82	33,10	8,95	1055,90	22,46
	Argissolo Bruno Acinzentado Alítico	-	-	-	-	800,97	17,04
	Argissolo Bruno Acinzentado Alumínico	-	-	-	-	188,69	4,01
	Argissolo Bruno Acinzentado Distrófico	-	-	25,87	7,00	8,66	0,18
	Argissolo Vermelho Amarelo Alumínico	-	-	-	-	433,75	9,23
	Argissolo Vermelho Amarelo Distrófico	45,97	35,53	16,11	4,36	175,80	3,74
	Argissolo Vermelho Amarelo Eutrófico	-	-	-	-	245,34	5,22
	Argissolo Vermelho Distrófico	-	-	17,74	4,80	-	-
	Argissolo Vermelho Eutrófico	-	-	-	-	25,97	0,55
	Cambissolo Háplico Distrófico	-	-	31,98	8,65	-	-
	Chernosso Háplico Órtico	-	-	-	-	42,81	0,91
	Gleissolo Melânico Eutrófico	-	-	-	-	51,35	1,09
	Luvissolo Crômico Pálico	-	-	-	-	378,44	8,05
	Luvissolo Háplico Órtico	-	-	-	-	2,69	0,06

	Neossolo Flúvico	-	-	-	-	117,91	2,51
	Neossolo Litólico	-	-	-	-	269,19	5,73
	Neossolo Litólico Distrófico	6,52	5,04	2,85	0,77	1,88	0,04
	Neossolo Quartzarênico Órtico	-	-	-	-	23,72	0,50
	Neossolo Regolítico Distrófico	-	-	-	-	17,85	0,38
	Neossolo Regolítico Eutrófico	-	-	-	-	46,60	0,99
	Neossolo Regolítico Húmico	-	-	-	-	4,16	0,09
	Planossolo Háplico Eutrófico	20,51	15,85	-	-	-	-
Declividade	0-3%	1842,30	14,24	32,04	8,66	470,36	10,01
	3-8%	3865,32	29,87	93,55	25,30	1493,73	31,77
	8-20%	6159,06	47,60	191,24	51,72	2392,11	50,88
	20-45%	1063,62	8,22	52,18	14,11	338,57	7,20
	> 45%	9,09	0,07	0,76	0,21	6,47	0,14

Com base na Tabela 3 e na Figura 6, é possível identificar que para as bacias, a maior predominância sobre o uso do solo é da classe Campo nativo, classe, esta, de vital importância para o segmento pecuária no estado do Rio Grande do Sul. De acordo com Carvalho, Maraschin e Nabinger (1998), a dimensão desta importância pode ser evidenciada pela sua extensão, sendo que grande parte são consideradas como formações campestres cuja caracterização corresponde à grande diversidade de espécies, onde a fisionomia está ligada aos diversos tipos de solo e condições climáticas predominantes em cada região fisiográfica do estado.

A classe menos presente, depois da Água, é a classe Floresta plantada (Tabela 3). Apesar de ser uma classe com pequena porcentagem, de acordo com EMBRAPA Florestas (2014), existe uma relevância cultural da floresta plantada, mais precisamente do eucalipto, no Brasil e que vem contribuindo de forma crescente para a geração de emprego e renda no meio rural e urbano, inclusive com participação expressiva na balança comercial, destacando-se nesse contexto a celulose e o papel como principais produtos destinados ao mercado externo. Conforme os mesmos autores, avanços nas técnicas silviculturais, no melhoramento genético e nos processos tecnológicos colocaram o Brasil em posição de grande destaque frente aos demais países que cultivam o eucalipto para atender, por exemplo, as necessidades energéticas e a fabricação de celulose e papel.

O mesmo se observa na declividade (Tabela 3) (Figura 5), com as bacias se enquadrando com maior predominância em declividades entre 8-20% e com menor área em declividades maiores que 45%. De acordo com EMBRAPA (2014), estes intervalos de declividade representam relevos Ondulado e Montanhoso, respectivamente. Diferente da BHAP, a qual apresenta as classes de declividades distribuídas ao longo da bacia, as bacias BHAF e BHRP apresentam maiores declividades na região de cabeceira, com declividade média de 9,94% e 10,18%, nesta ordem, e de 12,00% para a BHAP.

Considerando as classes de solo (Figura 7), por possuir uma área maior que as outras bacias, a BHRP possui uma maior diversidade de solos dispostos na bacia – 21 classes de solo comparadas às 5 e 6 classes da BHAF e BHAP, nesta

ordem. Todavia, para ambas as bacias, a classe que se destaca é a dos Argissolos, onde, para a BHAF e BHAP, existe a predominância do Argissolo Amarelo Distrófico e para a BHAP, do Argissolo Amarelo Eutrófico.

Streck et al. (2008) mencionam que os Argissolos são solos geralmente profundos a muito profundos, variando de bem drenados a imperfeitamente drenados e são originados de diversos tipos de materiais, tais como basaltos, granitos, arenitos, argilitos e siltitos. Conforme os mesmos autores, apresentam um perfil com uma sequência de horizontes A-Bt-C ou A-E-Bt-C, onde o horizonte B é do tipo B textural e significativamente mais argiloso do que os horizontes A e E.

Ainda de acordo com Streck et al. (2008), no Rio Grande do Sul foram identificados, no segundo nível categórico do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, de acordo com a cor que predomina no horizonte B textural: Argissolos Vermelho-Amarelos, Bruno-Acinzentados, Acinzentados e Amarelos. Enquanto as cores vermelhas e vermelho-amarelas indicam ambientes de boa drenagem, as cores bruno-acinzentadas e acinzentadas indicam solos com drenagem moderada ou imperfeita.

Segundo Bezerra (2006), a diferença entre distrófico e eutrófico dos Argissolos encontrados nas bacias pode ser atribuída à saturação, onde a expressão alta saturação se aplica a solos com valores de saturação superiores a 50% (Eutrófico) e a baixa saturação para valores inferiores a 50% (Distrófico). Esta característica está relacionada diretamente à fertilidade natural do solo, onde os atributos Eutrófico (alta fertilidade) e Distrófico (baixa fertilidade) indicam a necessidade ou não de adubação para uso agrícola (BEZERRA, 2006).

A Figura 9 ilustra as bacias hidrográficas e suas respectivas sub-bacias obtidas a partir da delimitação automática no ArcSWAT, considerando as seções de controle escolhidas. Essas informações são primordiais visto que delimitam as áreas de modelagem hidrológica utilizando como base a equação de balanço hídrico em cada HRU e, posteriormente, para cada sub-bacia. Como o SWAT considera, além da discretização em sub-bacias, a discretização em HRUs, na Tabela 4 são apresentadas informações com relação a estes níveis de discretização. Para a BHAF foram delimitadas 21 sub-bacias e 1022 HRUs, para a BHAP, 31 sub-bacias e 1824 HRUs e, para a BHRP, 43 sub-bacias e 3350 HRUs.

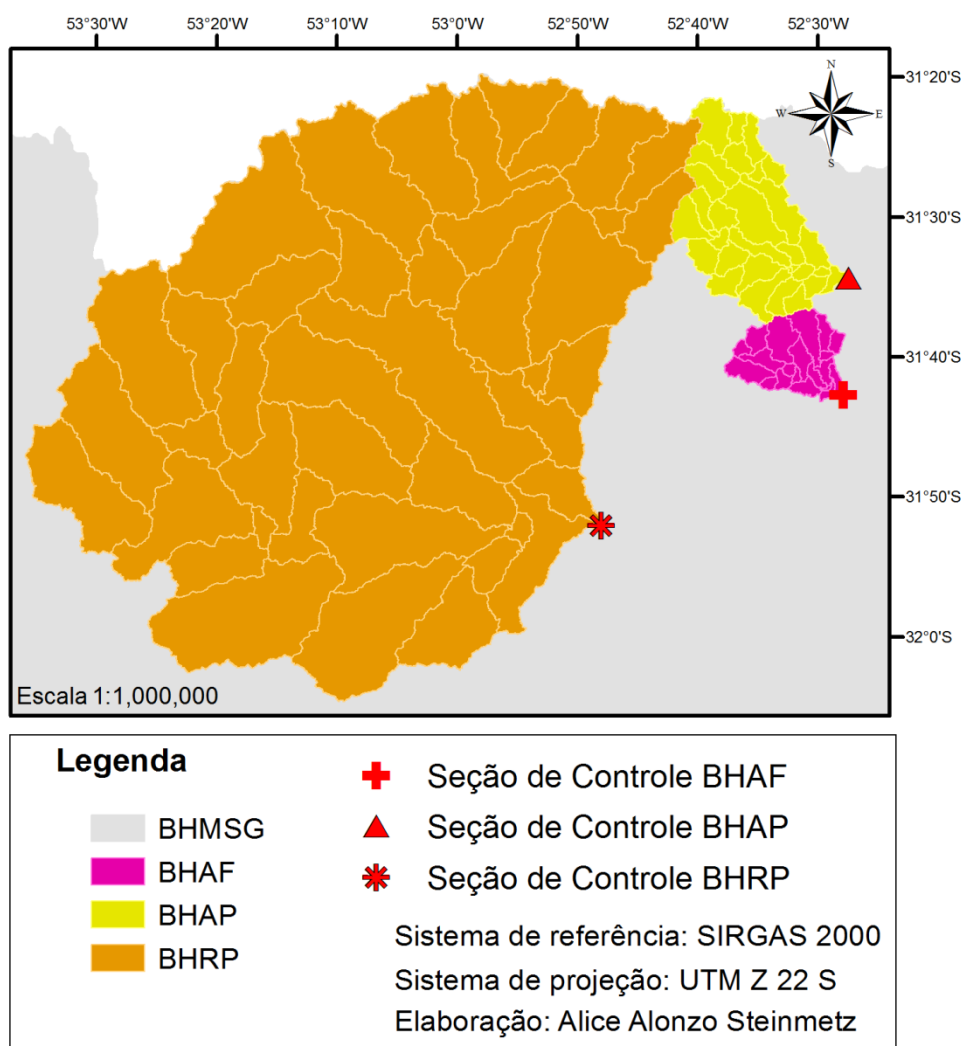


Figura 9 – Delimitação das bacias hidrográficas do arroio Fragata (BHAF), do arroio Pelotas (BHAP) e do rio Piratini (BHRP), com representação das suas localizações na bacia hidrográfica Mirim-São Gonçalo (BHMSG) e delimitação das respectivas sub-bacias de acordo com as seções de controle.

Tabela 4 – Área total resultante e quantificação dos níveis de discretização (sub-bacia e HRU) para as bacias hidrográficas do arroio Fragata (BHAF), do arroio Pelotas (BHAP) e do rio Piratini (BHRP)

BHAF			BHAP						BHRP					
Área (km²)	130		Área (km²)	370		Área (km²)	4700							
Sub-bacias	21		Sub-bacias	31		Sub-bacias	43							
HRUs	1022		HRUs	1824		HRUs	3350							
Sub-bacia	Área (km²)	HRUs	Sub-bacia	Área (km²)	HRUs	Sub-bacia	Área (km²)	HRUs	Sub-bacia	Área (km²)	HRUs	Sub-bacia	Área (km²)	HRUs
1	6,96	58	1	25,98	114	23	14,11	57	1	70,91	58	23	293,75	90
2	4,48	32	2	7,86	50	24	4,74	52	2	73,69	30	24	83,96	84
3	3,56	24	3	12,20	50	25	2,30	50	3	104,24	93	25	202,89	85
4	8,61	28	4	12,18	53	26	6,21	48	4	63,30	94	26	134,36	72
5	19,21	83	5	3,63	54	27	12,84	83	5	138,97	66	27	163,35	57
6	18,02	92	6	8,42	49	28	7,07	51	6	87,56	64	28	147,32	111
7	2,01	46	8	18,00	76	29	12,03	54	8	13,59	54	29	50,11	80
8	8,74	77	8	14,57	81	30	20,09	61	8	61,39	65	30	0,56	29
9	2,44	29	9	10,13	55	31	8,54	47	9	249,41	116	31	104,76	53
10	13,90	75	10	10,96	50				10	199,86	87	32	147,22	124
11	3,00	47	11	19,27	74				11	92,97	90	33	102,26	117
12	4,39	73	12	1,05	31				12	89,68	117	34	11,10	57
13	1,76	47	13	39,16	77				13	100,00	59	35	71,12	115
14	9,32	68	14	28,46	73				14	56,63	57	36	10,18	64
15	4,12	45	15	4,63	53				15	151,31	61	37	97,71	88
16	4,85	43	16	14,61	108				16	204,65	66	38	56,41	99
17	0,58	18	17	6,76	50				17	12,25	92	39	187,24	84
18	6,48	59	18	12,11	75				18	66,12	110	40	31,97	47
19	2,56	21	19	14,11	31				19	195,65	79	41	99,02	77
20	3,84	38	20	0,69	39				20	87,91	56	42	245,30	111
21	0,57	19	21	0,39	21				21	84,62	87	43	214,10	76
			22	16,69	57				22	41,87	29			

4.2. Desempenho do modelo SWAT

4.2.1. Calibração e validação

Na Figura 10, Figura 11 e Figura 12 podem ser visualizados os hidrogramas diários observados nas seções de controle e os estimados pelo modelo SWAT e na Figura 13, Figura 14 e Figura 15, os hidrogramas mensais observados nas seções de controle e os estimados pelo modelo, para a BHAF, BHAP e BHRP, nesta ordem.

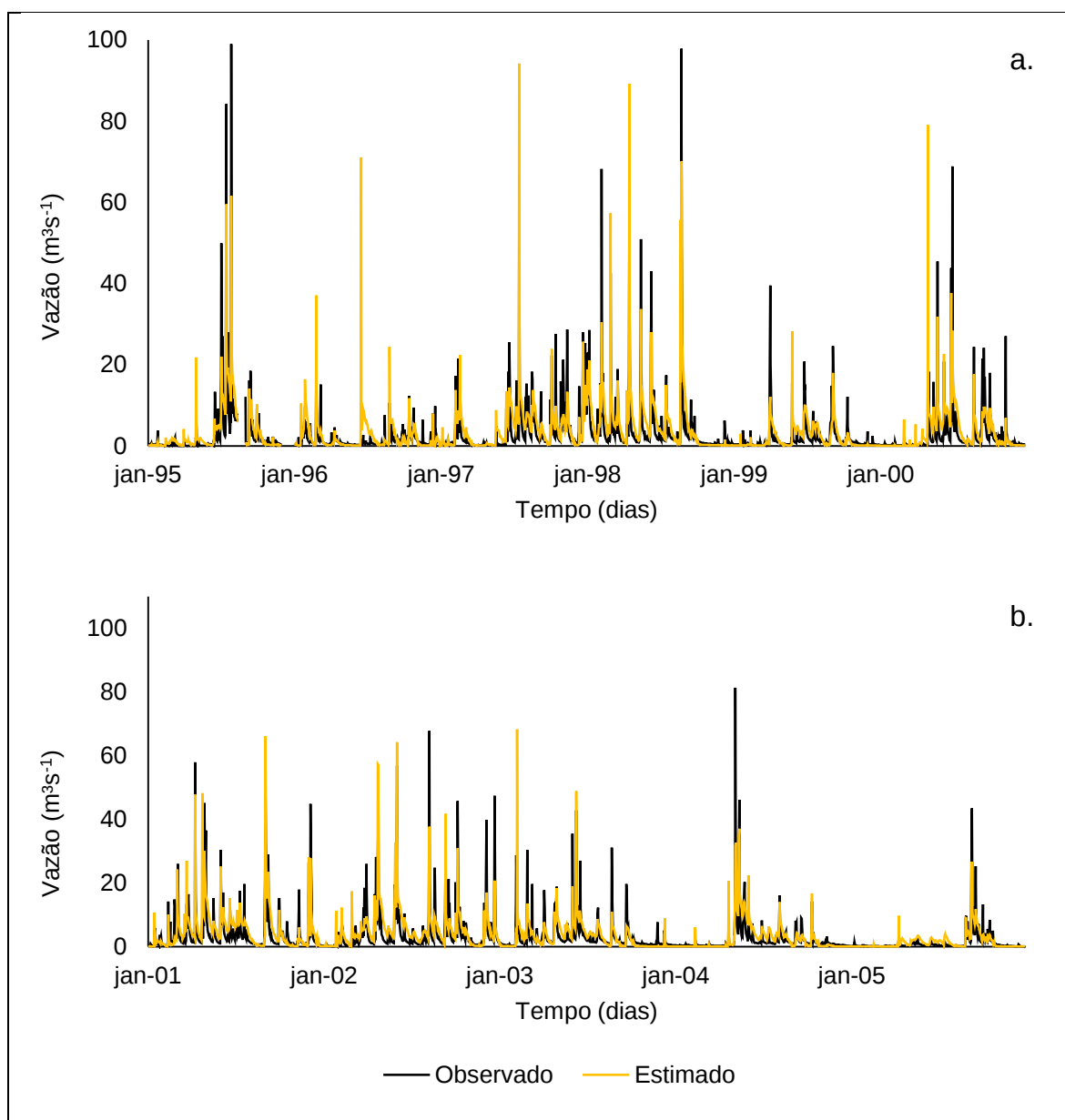


Figura 10 – Hidrogramas diários observados e estimados para a bacia hidrográfica do arroio Fragata para os períodos de calibração (1 de janeiro de 1995 a 31 de dezembro de 2000) (a) e validação (1 de janeiro de 2001 a 31 de dezembro de 2005) (b).

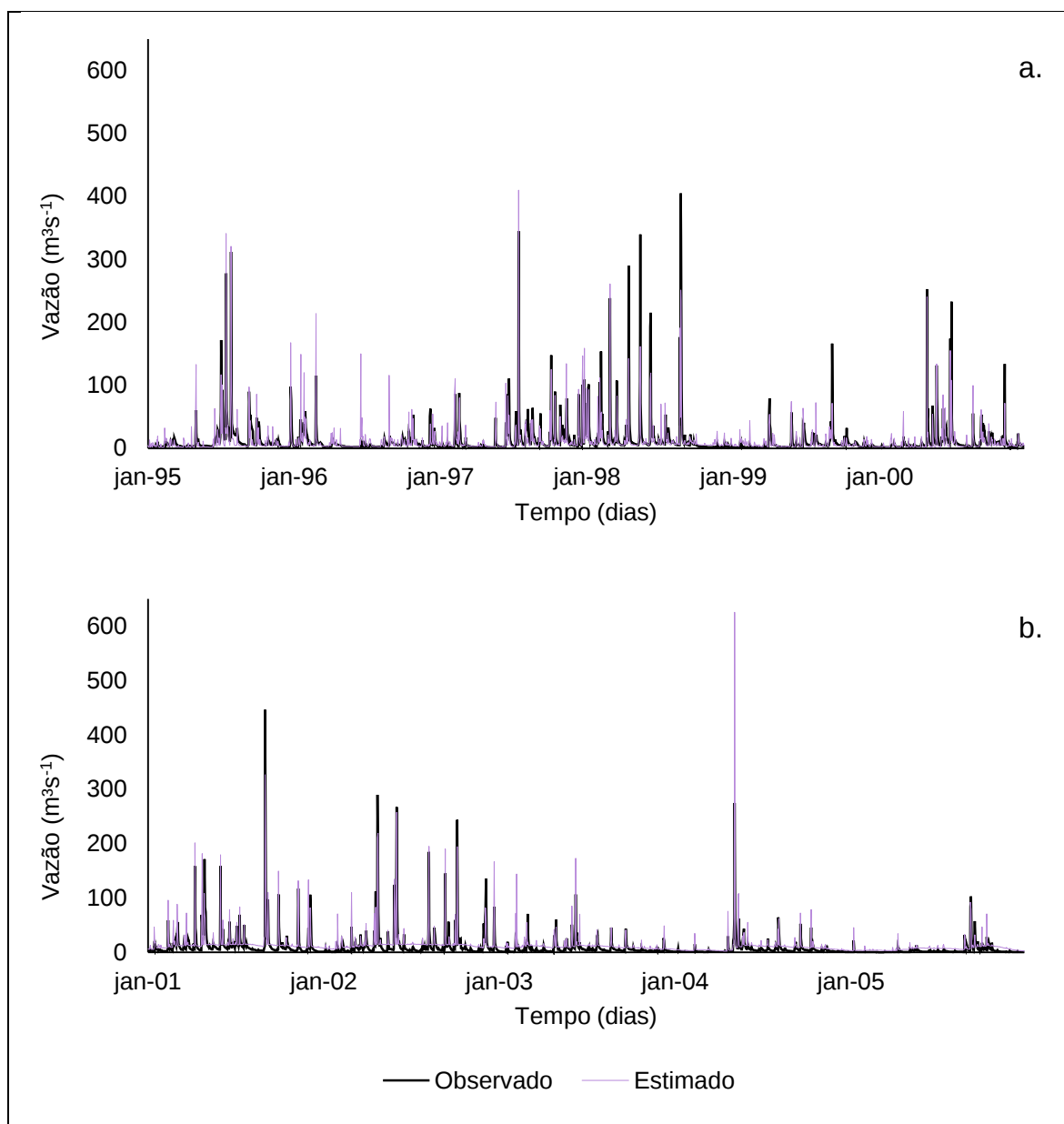


Figura 11 – Hidrogramas diários observados e estimados para a bacia hidrográfica do arroio Pelotas para os períodos de calibração (1 de janeiro de 1995 a 31 de dezembro de 2000) (a) e validação (1 de janeiro de 2001 a 31 de dezembro de 2005) (b).

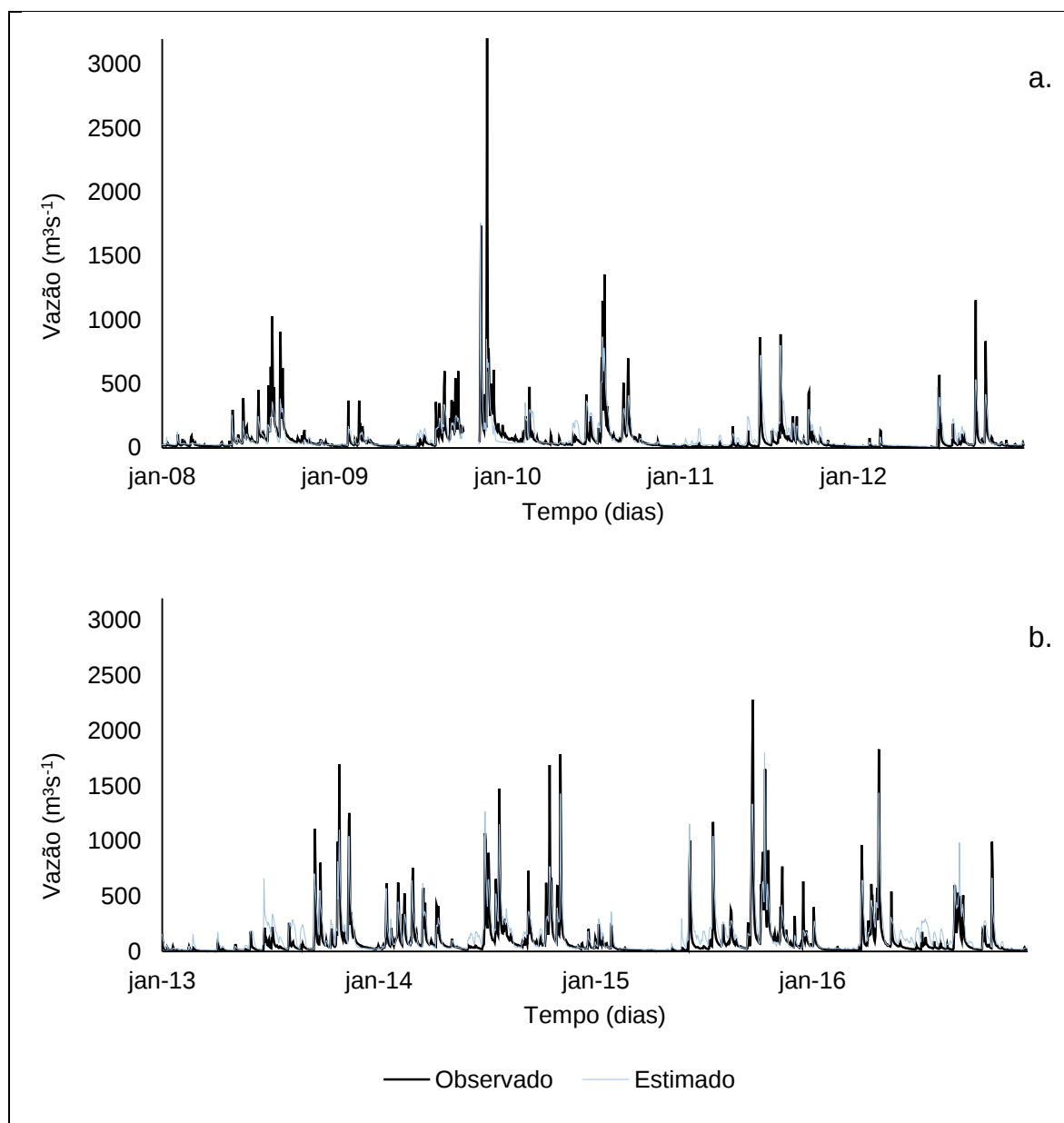


Figura 12 – Hidrogramas diários observados e estimados para a bacia hidrográfica do rio Piratini para os períodos de calibração (1 de janeiro de 2008 a 31 de dezembro de 2012) (a) e validação (1 de janeiro de 2013 a 31 de dezembro de 2016) (b).

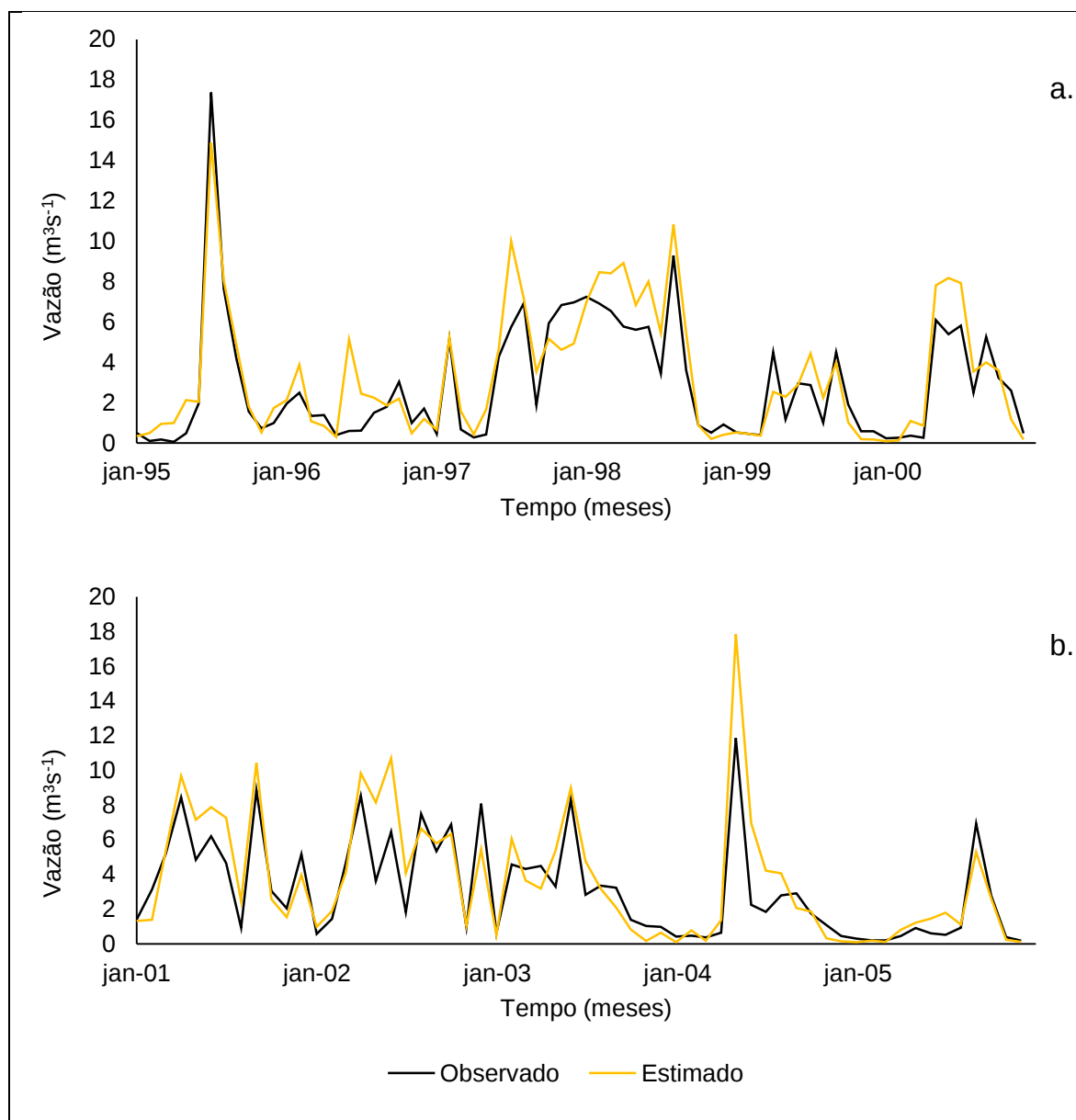


Figura 13 – Hidrogramas mensais observados e estimados para a bacia hidrográfica do arroio Fragata para os períodos de calibração (1 de janeiro de 1995 a 31 de dezembro de 2000) (a) e validação (1 de janeiro de 2001 a 31 de dezembro de 2005) (b).

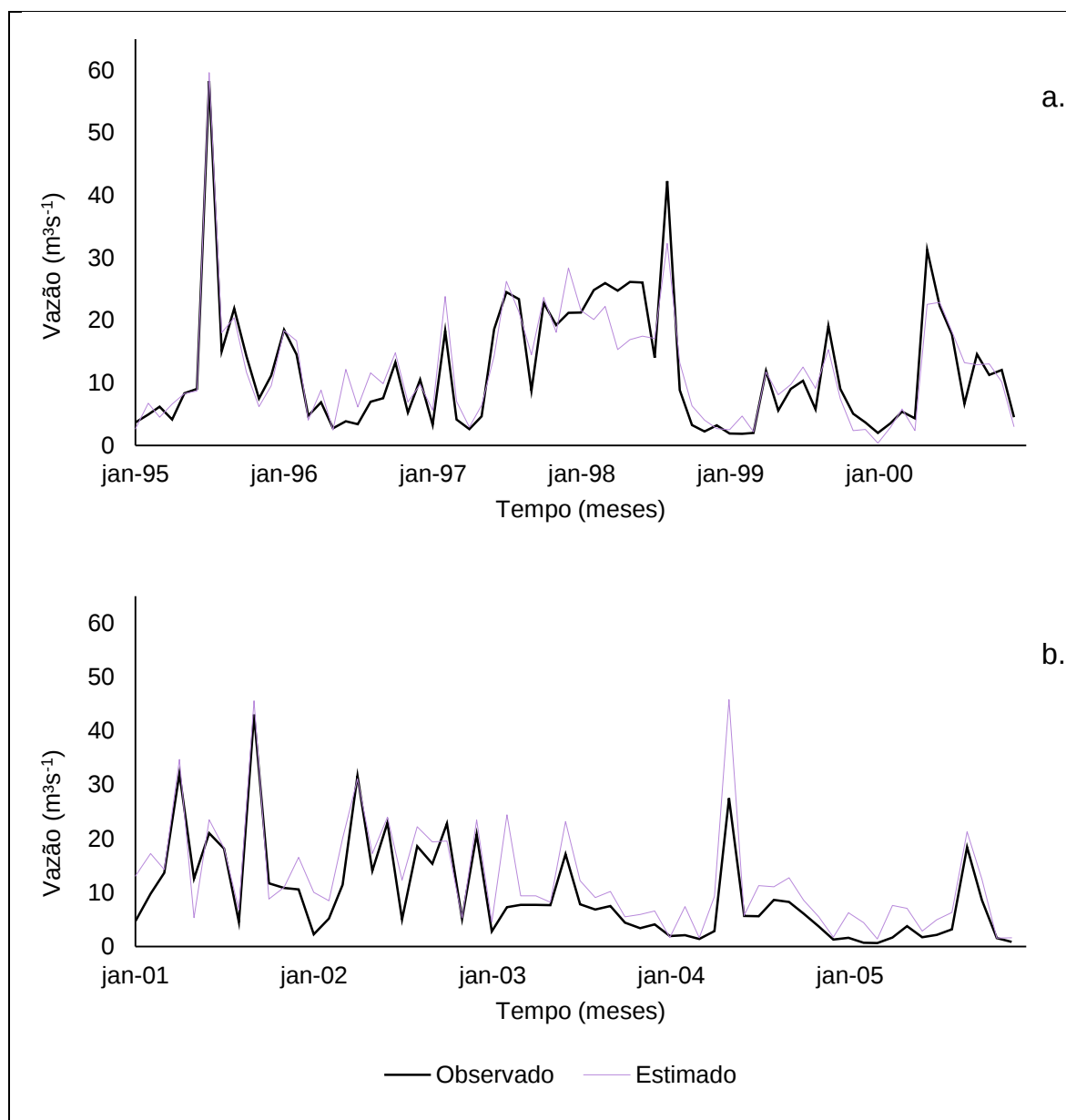


Figura 14 – Hidrogramas mensais observados e estimados para a bacia hidrográfica do arroio Pelotas para os períodos de calibração (1 de janeiro de 1995 a 31 de dezembro de 2000) (a) e validação (1 de janeiro de 2001 a 31 de dezembro de 2005) (b).

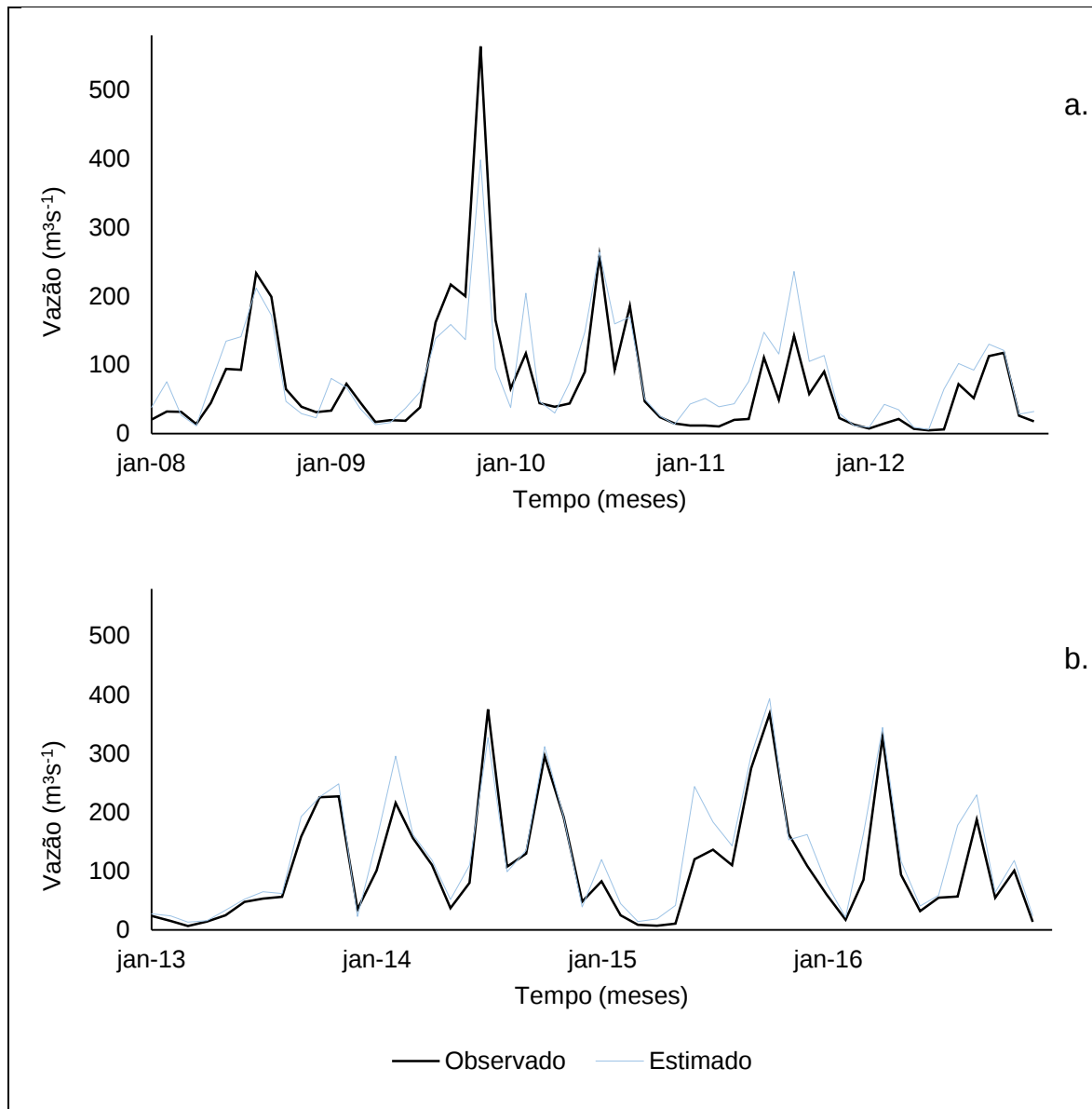


Figura 15 – Hidrogramas mensais observados e estimados para a bacia hidrográfica do rio Piratini para os períodos de calibração (1 de janeiro de 2008 a 31 de dezembro de 2012) (a) e validação (1 de janeiro de 2013 a 31 de dezembro de 2016) (b).

Ao analisar os hidrogramas observados e estimados (Figura 10, Figura 11, Figura 12, Figura 13, Figura 14 e Figura 15), é possível constatar que, de forma geral, o modelo SWAT conseguiu simular o comportamento das vazões nas seções de controle das bacias consideradas no estudo. Porém, pode-se perceber que existe uma dificuldade na estimativa dos picos considerando o passo diário de tempo (Figura 10, Figura 11 e Figura 12) quando comparados aos dados de vazões observadas, assim como em Viola et al. (2009), Pereira et al. (2014) e Pereira et al. (2016). Este comportamento é melhor representado quando considerado o passo de tempo mensal (Figura 13, Figura 14 e Figura 15).

Segundo Caldeira (2019), a subestimativa das vazões de pico é algo comum em modelagem hidrológica. Esta subestimativa pode estar relacionada, de acordo com Viola et al. (2009), a inúmeros fatores, com destaque para a variabilidade espacial da chuva e o intervalo de tempo adotado na modelagem. O estudo de Green et al. (2006), corrobora com os autores supracitados no tocante de considerar a influência que a rede de monitoramento existente e a distribuição das estações pluviométricas exercem sobre a estimativa das vazões de pico, além de ainda considerar a representatividade da curva-chave.

No estudo de Pereira et al. (2016), a questão dos erros associados à estimativa de picos foi atribuída à forma com que a distribuição das chuvas no SWAT é conduzida. De acordo com os mesmos autores, o SWAT associa cada sub-bacia à estação de monitoramento mais próxima do centroide e, como no referido estudo foram consideradas apenas cinco estações de monitoramento à montante da seção de controle da bacia em questão, a representatividade espacial de algumas chuvas foi comprometida. Além disso, os autores ainda mencionam que, combinado com a variação temporal da precipitação, que é difícil de representar com um passo diário, houve dificuldade de resposta do modelo SWAT na simulação de alguns picos de vazão.

No estudo de Caldeira (2019), a autora menciona a baixa representatividade da variabilidade espacial da chuva na BHAF e na BHAP pelo fato de que dentre as 16 estações pluviométricas consideradas no estudo e existentes na região, nenhuma delas está dentro da área de drenagem nas bacias em questão. Quanto ao intervalo de tempo empregado na modelagem hidrológica, como mencionado anteriormente, sabe-se que a calibração com dados de vazão média mensal, ou ainda anual, tende a proporcionar melhores estatísticas de precisão que a calibração com dados diários, visto que as oscilações diárias naquele período são atenuadas. E, considerando a representatividade da curva-chave de vazões, segundo Caldeira (2019), é possível identificar a existência de uma lacuna nas medições de vazões mais elevadas.

A Tabela 5 apresenta os resultados da análise de desempenho do modelo SWAT nas estimativas de vazões para as bacias analisadas, considerando os períodos de calibração e validação para os passos de tempo diário e mensal.

Tabela 5 - Estatísticas aplicadas para a avaliação do desempenho do modelo SWAT objetivando as simulações de vazões diárias e mensais para os períodos de calibração e validação nas bacias hidrográficas do arroio Fragata (BHAF), do arroio Pelotas (BHAP) e do rio Piratini (BHRP)

Bacias	Calibração						Validação					
	NS		NS log		PBIAS (%)		NS		NS log		PBIAS (%)	
	D	M	D	M	D	M	D	M	D	M	D	M
BHAF	0,58	0,79	0,35	0,62	-22,0	-15,85	0,61	0,64	0,40	0,71	-17,1	-16,31
BHAP	0,70	0,88	0,52	0,76	4,2	-0,47	0,61	0,69	0,50	0,60	-20,35	-32,14
BHRP	0,55	0,81	0,86	0,65	-13,26	-42,29	0,72	0,86	0,81	0,85	-32,38	-18,96

Nota: D = passo diário; M = passo mensal; NS = coeficiente de Nash e Sutcliffe; NS log = versão logarítmica do coeficiente de Nash e Sutcliffe; PBIAS = erro percentual.

Considerando a recomendação proposta por Moriasi et al. (2015) para valores de NS ao passo de tempo diário, como mostrado na Tabela 5, o procedimento de calibração resultou em desempenhos de modelo pelo menos satisfatórios ($NS > 0,5$) na estimativa da vazão das bacias durante o período de calibração. Durante a validação, as vazões calibradas também foram satisfatoriamente reproduzidas ($NS > 0,5$). Para a BHAF o modelo apresentou desempenho classificado como “satisfatório” (Moriasi et al., 2015) para todo o período de análise (calibração e validação) considerando o passo diário, apresentando NS de 0,58 e 0,60, respectivamente (Tabela 5). O desempenho classificado como “satisfatório” na calibração também foi verificado para a BHRP ($NS = 0,55$) e para BHAP ($NS = 0,7$).

Para a validação, a BHAP se igualou à BHAF em termos de valores de NS (0,61) para o passo diário, categorizadas como “satisfatório”, de acordo com Moriasi et al. (2015). É comum as estatísticas do período de validação serem piores que para o período de calibração, haja vista que os valores dos parâmetros são especificamente otimizados para o período de calibração e o período de validação pode ter condições diferentes (FUKUNAGA et al., 2015). Este comportamento não se repetiu para a BHRP, a qual apresentou NS de 0,55 na calibração, classificando-se como desempenho “satisfatório” (Moriasi et al., 2015) e 0,72 na validação, classificando-se como desempenho “bom” de acordo com mesmos autores.

É importante destacar que os limiares do NS considerados com desempenho satisfatório devem variar conforme o intervalo de tempo (diário, mensal ou anual). Por exemplo, de acordo com estudo de Zeiger e Hubbart (2017), os resultados mostraram que os valores NS melhoraram consideravelmente quando considerados intervalos de tempo mensal e anual e apontam para o benefício potencial de considerar diferentes limiares de NS para cada intervalo de tempo.

Zeiger e Hubbart (2017) ao aplicar o modelo SWAT encontraram, para o intervalo de tempo diário, o NS da calibração variando de $-0,33$ a $0,42$. Já para o intervalo de tempo mensal e anual, os valores de NS variaram de $0,02$ a $0,71$ e de $0,64$ a $0,92$, respectivamente.

No presente estudo também foram estimados os hidrogramas no passo de tempo mensal. Os resultados apontaram que para o passo de tempo mensal, considerando todas as bacias na calibração, os valores de NS apresentaram desempenho superior quando comparado ao passo de tempo diário (Tabela 5), corroborando com os resultados encontrados em Zeiger e Hubbart (2017). Para a validação, os valores de NS no passo de tempo mensal também foram superiores quando comparados ao passo de tempo diário, para todas as bacias.

Este assunto também foi abordado por Sudheer et al. (2007), os quais avaliaram o impacto do intervalo de tempo sobre o desempenho do modelo SWAT na calibração, validação e simulação. Segundo os autores, em muitos modelos hidrológicos são calibrados e validados em escala mensal ou anual, com boas estatísticas de precisão, e depois realizam simulações diárias, para as quais o desempenho satisfatório não é assegurado. Neste segmento, os autores ainda sugerem que a calibração dos modelos seja realizada no intervalo de tempo diário, preservando com precisão o comportamento hidrológico da bacia. No entanto, Beskow et al. (2011) relatam que a calibração de modelos hidrológicos em escala diária pode ter maior dificuldade na estimativa das vazões de pico em bacias hidrográficas com tempo de concentração inferior a um dia, as quais são sensíveis a eventos de precipitação de curta duração.

A aplicação da estatística NS para a avaliação do desempenho do modelo SWAT frente à estimativa de vazões vem sendo aplicada em todo o mundo, como em Mengistu e Sorteberg (2012), Zhang, Xu e Fu (2014), Golmohammadi et al. (2017), Vigiak et al. (2017), Zeiger e Hubbart (2017), Tuo et al. (2018) e Teklay et al. (2019). No Brasil, estudos também vêm sendo desenvolvidos contemplando esta temática, como em Andrade, Mello e Beskow (2013), Bressiani et al. (2015), Fukunaga et al. (2015), Oliveira et al. (2017), Hernandez, Scarpere e Seabra (2018), Santos et al. (2018) e Silva et al. (2018).

Quando considerado o NS log para o intervalo diário (Tabela 5), para a BHAF o resultado da estatística foi classificado como “insatisfatório” (Moriassi et al., 2015) tanto para calibração quanto para validação, com valores de $0,35$ e $0,40$, nesta

ordem. Ao contrário do que indicou o NS para a BHAF, os resultados do NS log podem indicar que o SWAT possui desempenho insatisfatório na estimativa de vazões mais baixas ou ainda, que a calibração, validação, dados de entrada e o modelo como um todo não tiveram uma boa performance. Para a BHAP e BHRP, o desempenho do SWAT foi superior, apresentando valores maiores que 0,5, ou seja, desempenho satisfatório. Segundo Pereira et al. (2016), apesar de ser importante para a avaliação de desempenho considerando vazões mínimas, estudos que considerem o NS log para avaliar o SWAT são escassos.

Com relação ao PBIAS para o intervalo diário (Tabela 5), tanto para o período de calibração quanto para o período de validação, as vazões, de forma geral, foram superestimadas para todas as bacias. O PBIAS para a calibração da BHAF foi de -22% e para validação da BHAF resultou no valor de -17,06%, valores estes que se classificam com desempenho “insatisfatório” (Moriasi et al., 2015). Para a BHAP, a calibração apresentou PBIAS de 4,2% (Tabela 5), classificando-o como “muito bom”, e, para a validação o PBIAS atingiu o valor de -20,35%, indicando a classificação em “insatisfatório”. Já para a BHRP, a calibração apresentou desempenho “satisfatório” (PBIAS = -13,26%), enquanto que na validação o desempenho foi “insatisfatório” (PBIAS = -42,29%).

Os resultados apresentados na Figura 16, Figura 17 e Figura 18 permitem uma melhor visualização do viés entre as vazões observadas e as estimadas. A partir delas pode-se observar que as vazões são superestimadas para as bacias em análise, tanto para calibração, quanto para validação, o que corrobora com os resultados do PBIAS para ambas as bacias (Tabela 5).

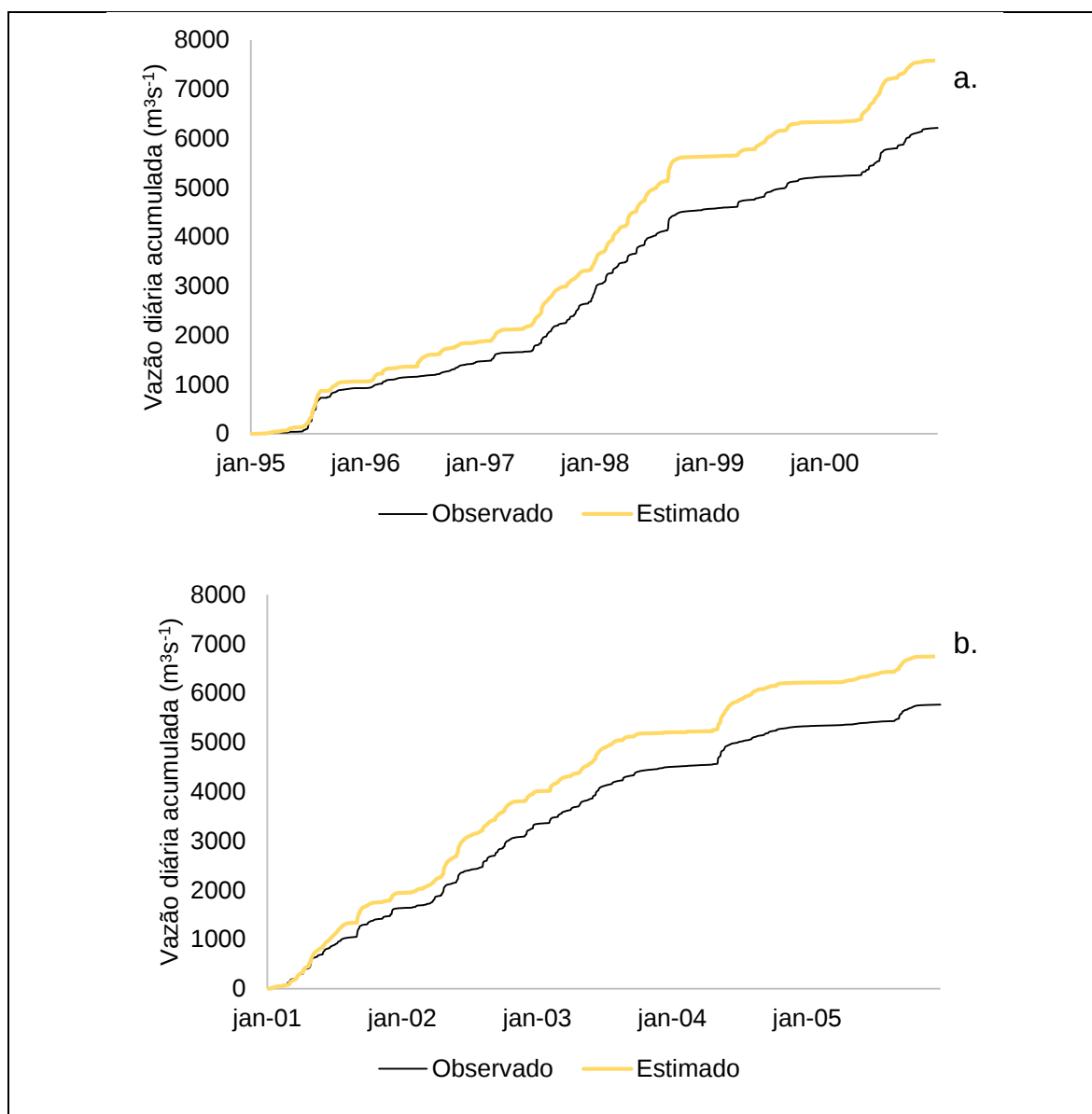


Figura 16 – Vazões médias diárias acumuladas para os períodos de calibração (1995 - 2000) e validação (2001 - 2005) para bacia hidrográfica do arroio Fragata.

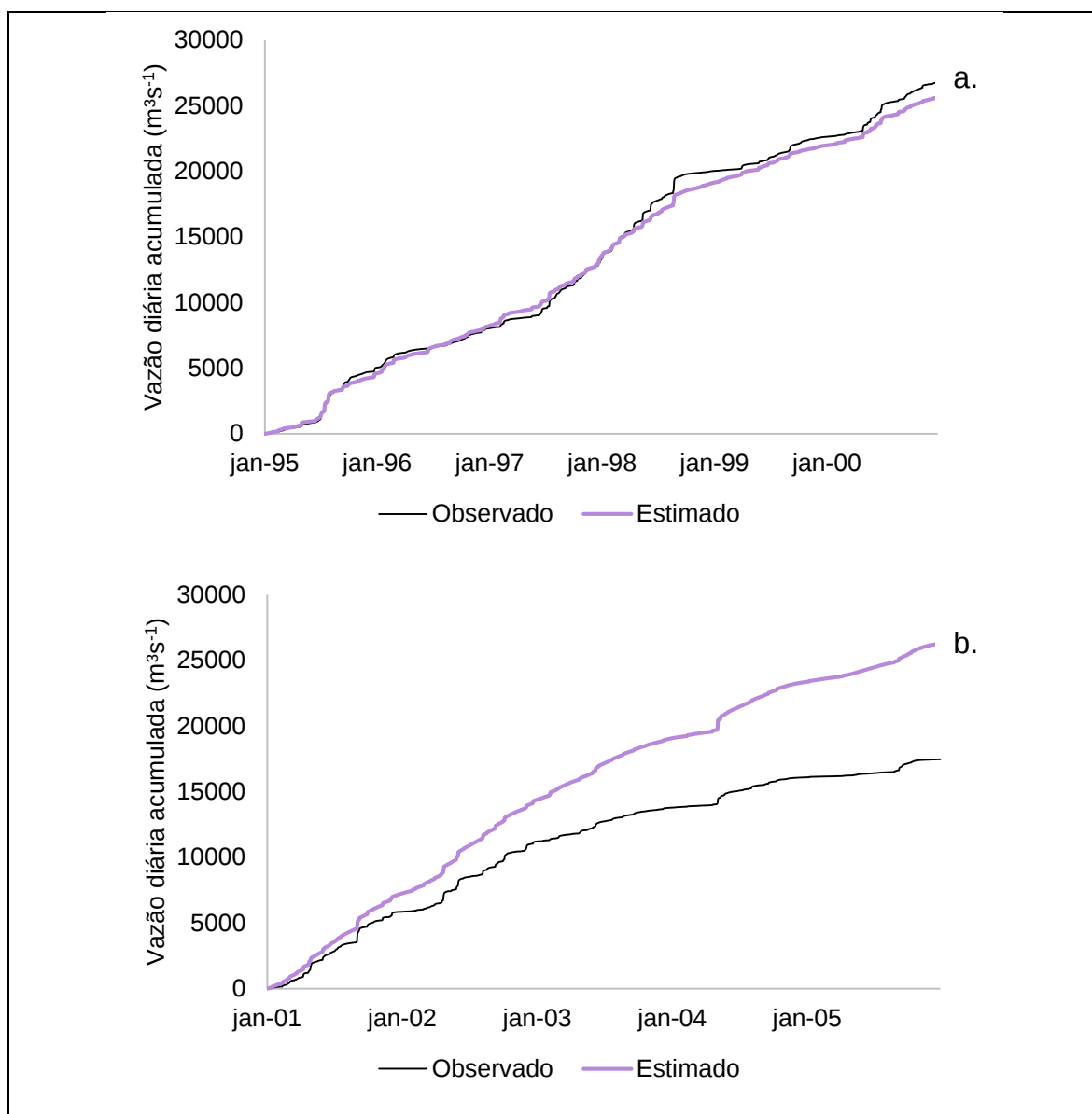


Figura 17 – Vazões médias diárias acumuladas para os períodos de calibração (1995 - 2000) e validação (2001 - 2005) para bacia hidrográfica do arroio Pelotas.

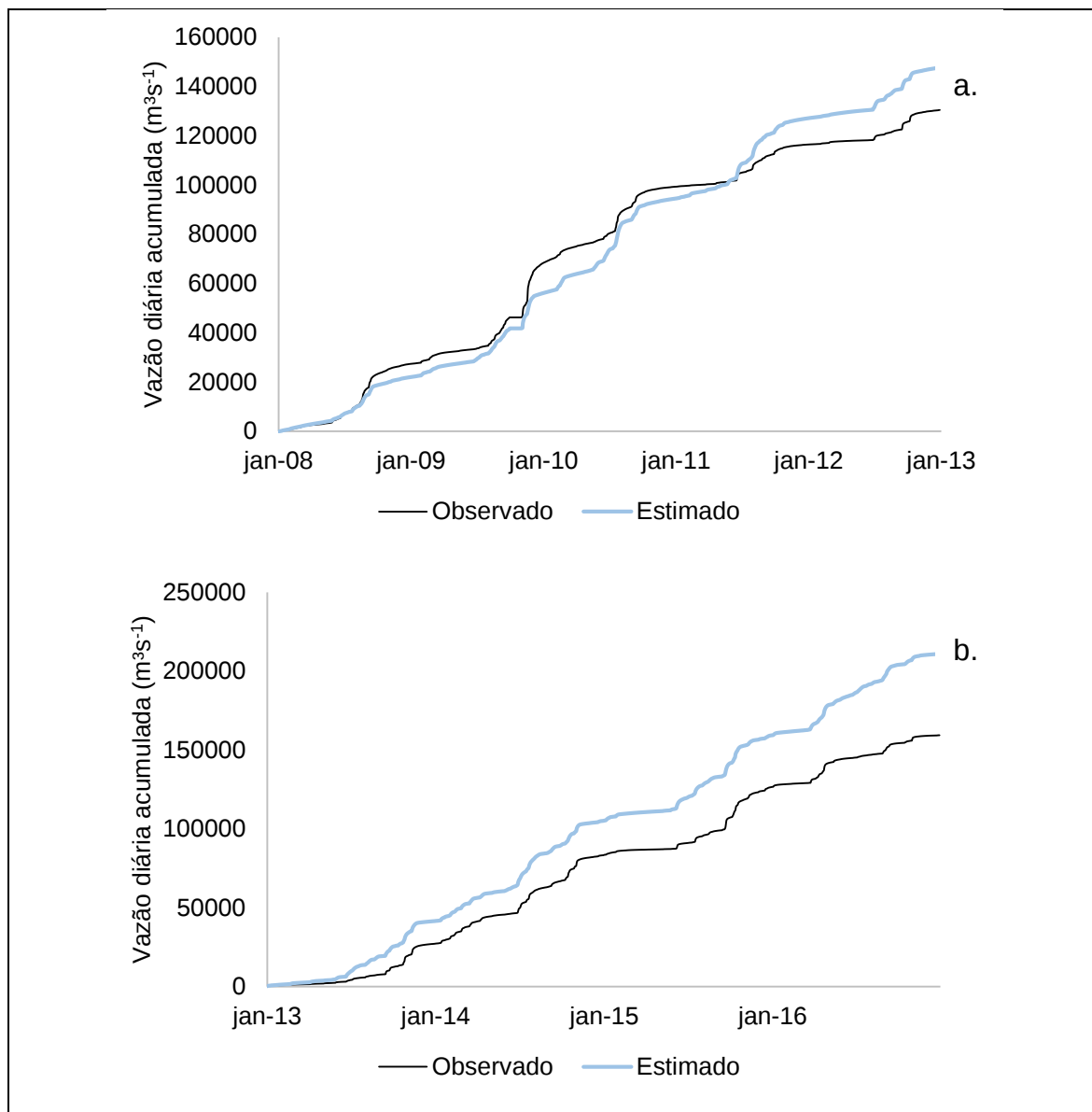


Figura 18 – Vazões médias diárias acumuladas para os períodos de calibração (2008 - 2012) e validação (2013 - 2016) para bacia hidrográfica do rio Piratini.

Tobin e Bennett (2009) encontraram resultados para a modelagem com o SWAT que superestimaram consideravelmente as vazões durante os períodos secos. Já o desempenho superior durante os períodos chuvosos foi atribuído à calibração do modelo com dados de condição úmida, correspondente à precipitação acima da média para a bacia hidrográfica. Van Liew et al. (2007) indicam que o modelo promove melhores estimativas sob climas mais úmidos e, segundo Feyereisen et al. (2007), possuem maior dificuldade contabilizar com precisão o armazenamento de água no solo e a perda de água por infiltração e evapotranspiração, especialmente durante períodos secos. No entanto, um problema documentado do SWAT é o desempenho em eventos de vazão extrema

em que o modelo tende a subestimar consideravelmente a vazão (TOBIN e BENNETT, 2009).

4.2.2. Análise de indicadores hidrológicos

Para uma melhor percepção do desempenho do modelo SWAT frente à estimativa de vazões máximas, médias e mínimas, a Figura 19, Figura 20 e a Figura 21 ilustram os indicadores anuais observados e estimados para a BHAF, BHAP e BHRP, nesta ordem.

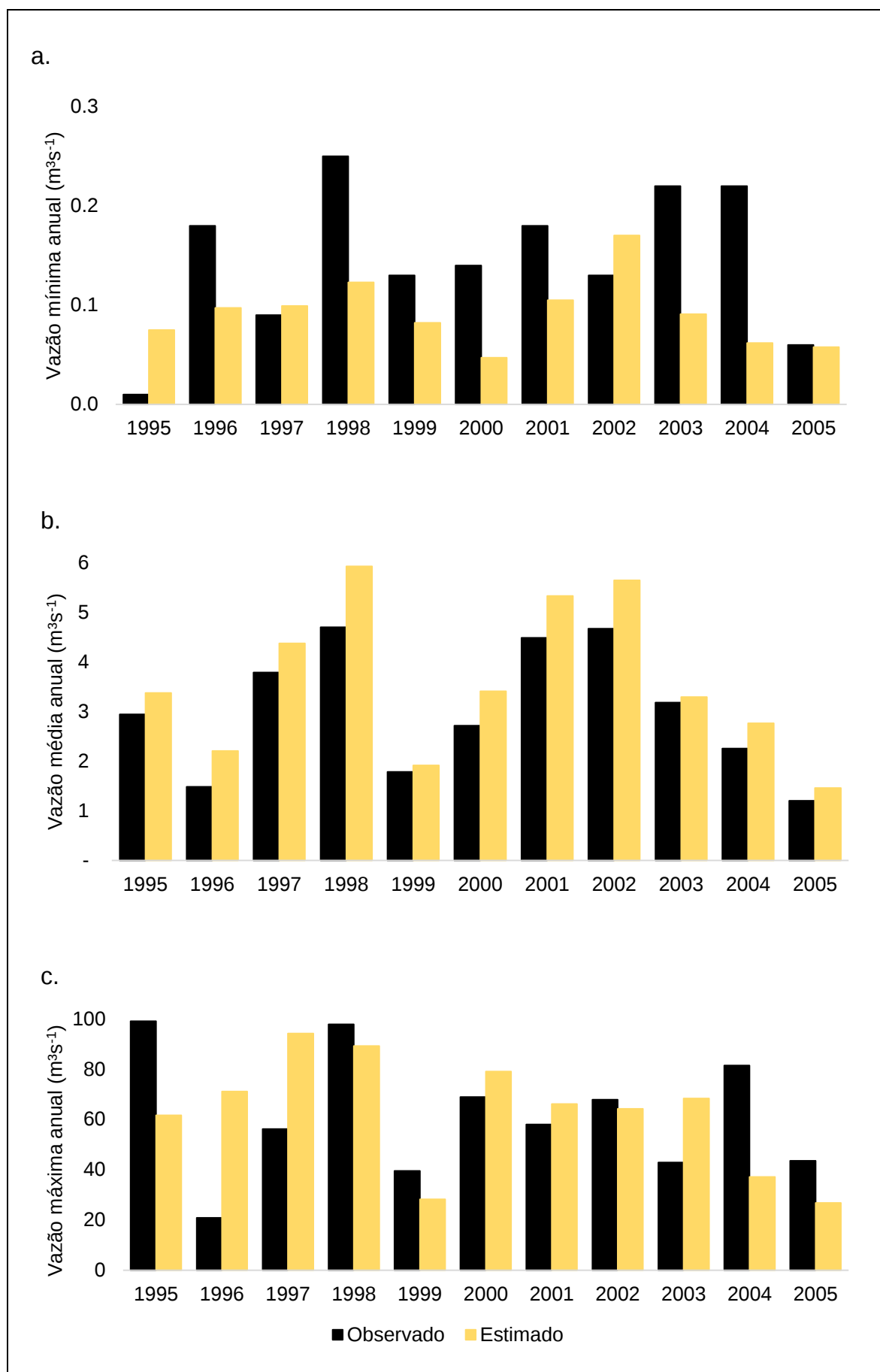


Figura 19 – Vazões mínimas (a), médias (b) e máximas (c) diárias observadas para a bacia hidrográfica do arroio Fragata, assim como as estimadas com o SWAT.

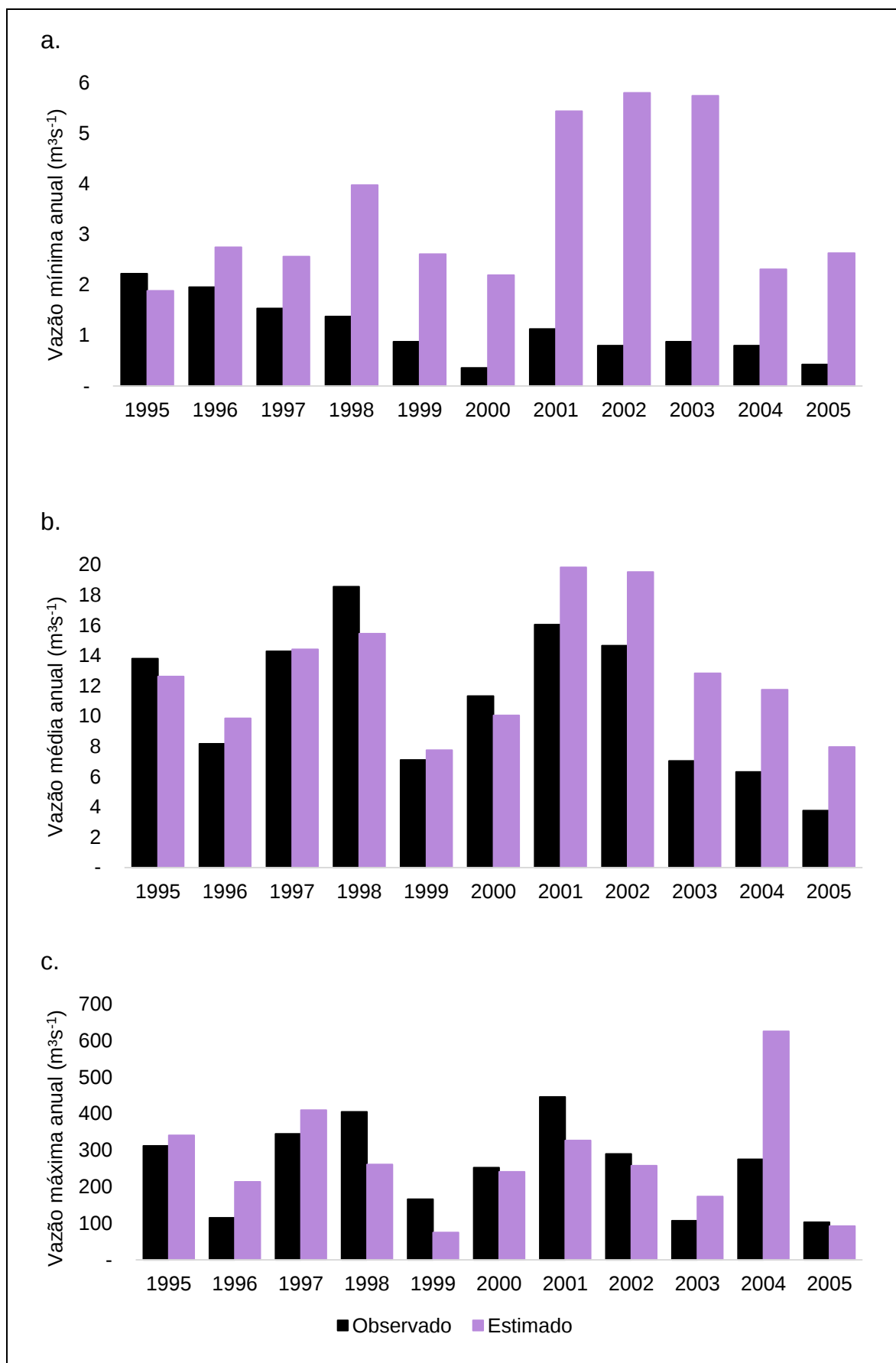
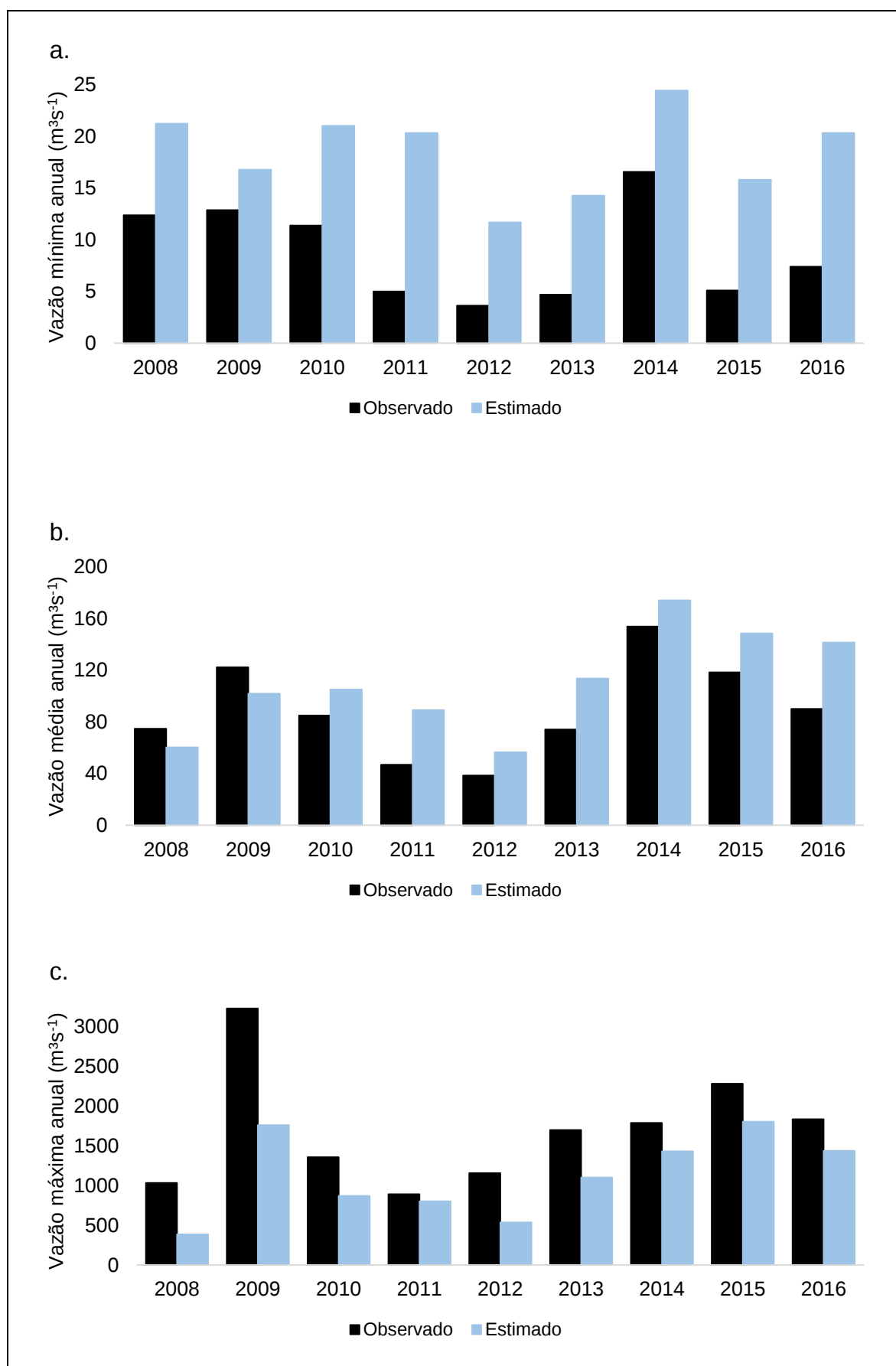


Figura 20 – Vazões mínimas (a), médias (b) e máximas (c) diárias observadas para a bacia hidrográfica do arroio Pelotas, assim como as estimadas com o SWAT.



Com relação às vazões mínimas anuais (Figura 19a, Figura 20a e Figura 21a), pode-se averiguar que ocorreu uma subestimativa de vazões na BHAF para a maioria dos anos, ao contrário do que ocorreu na BHAP e na BHRP. Na BHAP e na BHRP, houve uma superestimativa das vazões mínimas em todos os anos. Já as Figura 19c e Figura 20c mostram que o modelo SWAT, validado para a BHAF e BHAP, apresentou um equilíbrio entre superestimação e subestimação das vazões máximas anuais. Ao contrário do que ocorreu para a BHRP (Figura 21c), onde, de forma geral, as vazões máximas anuais foram subestimadas.

Dos anos que ocorreram a superestimativa, deve-se destacar 2004. De acordo com Caldeira (2019), no dia 07 de maio de 2004, o pluviômetro instalado próximo à seção de controle da BHAP registrou um total acumulado de 344,5 mm de precipitação, o segundo maior valor verificado no local desde a instalação do equipamento, em 1964. Em decorrência do evento de precipitação, a vazão média diária observada na BHAP foi de $275 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, enquanto que a estimada foi de $625,80 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

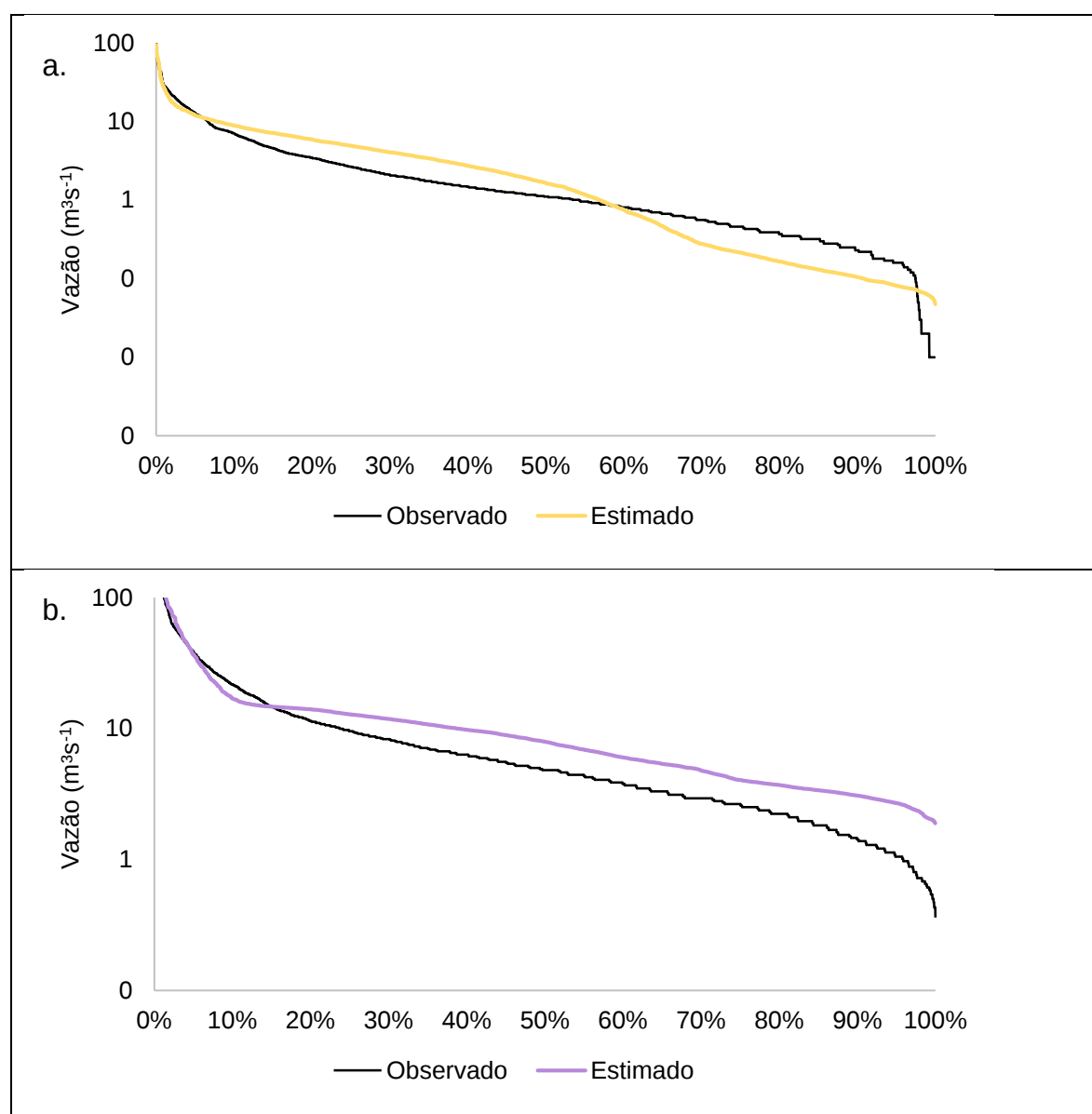
Segundo a mesma autora, embora tenha ocorrido considerável superestimativa do valor observado, esta diferença poderia ser reduzida se o monitoramento na seção de controle fosse em escala temporal menor, visto que a bacia apresenta tempo de concentração inferior a um dia e a vazão média diária é obtida pela média das vazões para duas leituras (07 e 17 horas) da régua linimétrica, as quais, além de muito provavelmente não terem captado o pico dos hidrogramas, acabam por atenuar tal vazão.

Considerando as vazões médias anuais (Figura 19b, Figura 20b e Figura 21b), é possível analisar que, para a maioria dos anos, as vazões foram superestimadas para todas as bacias. E, de posse da Q_{mlt} , é possível inferir sobre o rendimento específico e produção de água da bacia, que é a vazão média por área de drenagem (Tabela 6). Esses erros de sub e superestimativa, de acordo com Pereira et al. (2016), são dimensionais e mostram a dificuldade do modelo em representar alguns valores de vazão máxima devido à dificuldade de representações espaciais e temporais da precipitação, como mencionado anteriormente.

Tabela 6 – Vazão média de longo termo (Q_{mlt}) e produção de água para as bacias do arroio Fragata (BHAF), do arroio Pelotas (BHAP) e do rio Piratini (BHRP)

Bacia	Área (km ²)	Q_{mlt} (m ³ s ⁻¹)		Produção de água (L s ⁻¹ km ⁻²)	
		Observado	Estimado	Observado	Estimado
BHAF	130	3,02	3,61	23,22	27,78
BHAP	370	11,01	12,92	29,76	34,92
BHRP	4700	89,02	110,19	18,94	23,44

A Figura 25 apresenta as curvas de permanência de vazões médias diárias observadas na seção de controle das bacias e as vazões estimadas pelo SWAT para os períodos de calibração e validação.



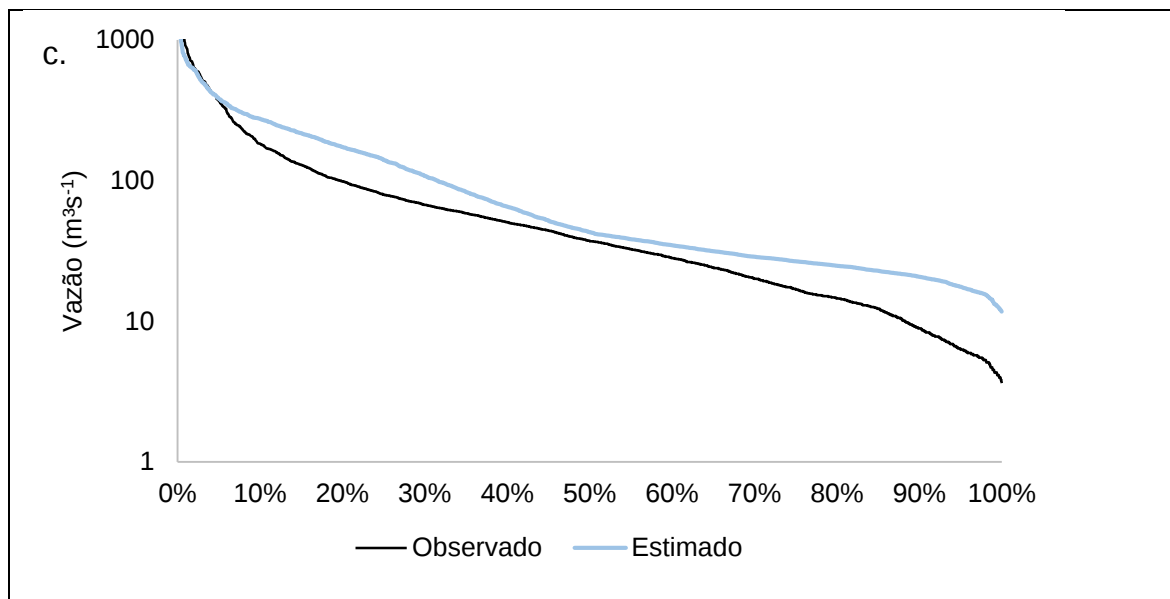


Figura 22 – Curvas de permanência de vazões médias diárias observadas e vazões médias diárias estimadas para as bacias hidrográficas do arroio Fragata (a), do arroio Pelotas (b) e do rio Piratini (c).

É possível verificar visualmente que, de modo geral, as curvas de permanência estimadas foram condizentes com as observadas, para todas as bacias. O afastamento das curvas é notado na BHAF (Figura 22a) para vazões com permanência entre 10 e 60% e superior à 70% do tempo, enquanto que na BHAP (Figura 22b), para vazões com permanência superior à 20%. Já para a BHRP (Figura 22c), o afastamento ocorreu entre 5% e 50% e para vazões com permanência superior a 60%. Um aspecto que influencia na curva de permanência é a utilização dos resultados da calibração e da validação na mesma curva. A partir das curvas de permanência (Figura 22), reproduziu-se, na Tabela 7, algumas vazões de referência e suas respectivas vazões observadas e estimadas.

Tabela 7 – Vazões de referência da curva de permanência e suas respectivas vazões médias observadas e estimadas para as bacias hidrográficas dos arroios Fragata (BHAF) e Pelotas (BHAP) e do rio Piratini (BHRP)

Vazão de referência	BHAF		BHAP		BHRP	
	Observada	Estimada	Observada	Estimada	Observada	Estimada
	(m³ s⁻¹)	(m³ s⁻¹)	(m³ s⁻¹)	(m³ s⁻¹)	(m³ s⁻¹)	(m³ s⁻¹)
Q ₁₀	7,10	8,89	21,72	16,95	182,59	275,00
Q ₂₀	3,48	5,91	11,38	14,02	98,95	173,30
Q ₃₀	2,09	4,05	8,30	11,84	67,20	107,80
Q ₄₀	1,48	2,73	6,32	9,80	50,68	65,19
Q ₅₀	1,11	1,65	4,81	7,95	37,26	43,01
Q ₆₀	0,81	0,75	3,78	6,03	28,17	34,66
Q ₇₀	0,56	0,28	2,93	4,79	20,08	28,73
Q ₈₀	0,37	0,17	2,23	3,70	14,54	24,79

Q ₉₀	0,23	0,10	1,42	3,08	8,91	20,69
Q ₉₅	0,16	0,08	1,05	2,70	6,30	17,58
Q ₉₈	0,03	0,07	0,72	2,32	5,31	15,52

Averiguando a Tabela 7 e também a Figura 22, é possível verificar que, para a BHAF e a BHRP, as vazões máximas da curva de permanência tendem a ser superestimadas pelo modelo SWAT, ao passo que as vazões mínimas são superestimadas, para todas as bacias. Estes resultados corroboram com os encontrados em Pereira et al. (2016), os quais mostraram que as vazões estimadas pelo SWAT abaixo de 50% de permanência foram superestimadas, com exceção da permanência abaixo de 5%, onde, da mesma forma que a BHAP, as vazões foram subestimadas.

Ainda em Pereira et al. (2016), foram extraídas a Q₉₀ e a Q₉₅, as quais resultaram em valores subestimados quando comparados aos valores observados da curva de permanência (14,0 e 10,7 m³ s⁻¹) com os valores estimados da curva (11,0 e 8,6 m³ s⁻¹), respectivamente. Para o presente estudo, a Q₉₀ e a Q₉₅ foram subestimadas para a BHAF, com vazões observadas de 0,23 e 0,16 m³ s⁻¹ e vazões estimadas de 0,08 e 0,10 m³ s⁻¹, nesta ordem. Já para a BHAP, os valores foram superestimados: 3,08 e 2,70 m³ s⁻¹ para vazões observadas e 1,42 e 1,05 m³ s⁻¹ para as vazões estimadas, considerando a Q₉₀ e a Q₉₅, respectivamente. Para a BHRP, foi observado uma superestimativa de 179% para a Q₉₅ e 132% para a Q₉₀.

4.3. Projeções climáticas

A partir das séries de dados diários de MXTP, MNTP e PREC obtidas para os modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5, ETA-HADGEM2, foram calculadas, considerando as bacias em estudo, as projeções de temperatura média mensal e de precipitação média mensal para o CP, P1, P2 e P3, as quais estão apresentadas na Tabela 8 e na Tabela 9, respectivamente.

Tabela 8 – Temperatura média mensal (°C) para as bacias hidrográficas do arroio Fragata, do arroio Pelotas e do rio Piratini, derivada dos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, MIROC5 e ETA-HADGEM2 e Ensemble Mean para o RCP 4.5 e RCP 8.5 considerando o clima passado (CP) e os períodos futuros P1, P2 e P3

BHAF	RCP	ETA-BESM	ETA-CANESM2	ETA-MIROC5	ETA-HADGEM2	Ensemble Mean
CP (1965-2005)		18.97	18.97	18.95	19.10	19.00
P1 (2006-2040)	4.5	19.12	20.11	19.32	20.32	19.72
	8.5	19.55	20.19	19.54	20.57	19.96
P2 (2041-2070)	4.5	19.69	20.98	19.73	20.95	20.34
	8.5	20.76	21.47	20.17	21.27	20.92
P3 (2071-2099)	4.5	19.78	21.41	19.91	21.27	20.59
	8.5	22.15	22.76	20.88	22.87	22.16
BHAP	RCP	ETA-BESM	ETA-CANESM2	ETA-MIROC5	ETA-HADGEM2	Ensemble Mean
CP (1965-2005)		18.52	18.52	18.50	18.66	18.55
P1 (2006-2040)	4.5	18.66	19.68	18.88	19.94	19.29
	8.5	19.11	19.77	19.09	20.22	19.55
P2 (2041-2070)	4.5	19.23	20.56	19.31	20.56	19.91
	8.5	20.36	21.09	19.76	20.92	20.53
P3 (2071-2099)	4.5	19.31	20.99	19.45	20.89	20.16
	8.5	21.79	22.46	20.45	22.55	21.81
BHRP	RCP	ETA-BESM	ETA-CANESM2	ETA-MIROC5	ETA-HADGEM2	Ensemble Mean
CP (1965-2005)		17.94	17.94	17.92	18.08	17.97
P1 (2006-2040)	4.5	18.02	19.13	18.31	19.40	18.72
	8.5	18.52	19.22	18.49	19.74	18.99
P2 (2041-2070)	4.5	18.60	20.01	18.75	20.05	19.35
	8.5	19.83	20.58	19.24	20.47	20.03
P3 (2071-2099)	4.5	18.70	20.46	18.89	20.37	19.61
	8.5	21.30	22.07	19.89	22.14	21.35

Tabela 9 – Precipitação média mensal (mm) para as bacias hidrográficas do arroio Fragata, do arroio Pelotas e do rio Piratini, derivada dos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, MIROC5 e ETA-HADGEM2 e Ensemble Mean para o RCP 4.5 e RCP 8.5 considerando o clima passado (CP) e os períodos futuros P1, P2 e P3

BHAF	RCP	ETA-BESM	ETA-CANESM2	ETA-MIROC5	ETA-HADGEM2	Ensemble Mean
CP (1965-2005)		116.37	115.07	114.89	112.99	114.83
P1 (2006-2040)	4.5	133.33	127.53	125.38	117.90	126.03
	8.5	124.52	130.92	127.23	115.08	124.44
P2 (2041-2070)	4.5	133.27	133.08	127.15	127.57	130.27
	8.5	122.76	135.78	130.31	127.74	129.15
P3 (2071-2099)	4.5	130.94	130.25	131.58	128.69	130.36
	8.5	109.93	109.31	138.17	138.41	123.96
BHAP	RCP	ETA-BESM	ETA-CANESM2	ETA-MIROC5	ETA-HADGEM2	Ensemble Mean
CP (1965-2005)		125.23	124.25	123.86	121.96	123.82
P1 (2006-2040)	4.5	139.33	137.41	134.60	127.08	134.60
	8.5	132.01	141.11	135.49	123.20	132.95
P2 (2041-2070)	4.5	139.83	142.69	135.55	135.90	138.49
	8.5	130.53	144.38	138.11	135.51	137.13
P3 (2071-2099)	4.5	136.00	138.51	139.70	136.07	137.57
	8.5	119.39	117.66	146.31	146.03	132.35
BHRP	RCP	ETA-BESM	ETA-CANESM2	ETA-MIROC5	ETA-HADGEM2	Ensemble Mean
CP (1965-2005)		121.00	119.55	119.16	117.41	119.28
P1 (2006-2040)	4.5	133.03	133.79	129.95	125.47	130.56
	8.5	127.23	137.78	130.92	120.60	129.14
P2 (2041-2070)	4.5	134.58	137.72	129.87	134.21	134.09
	8.5	124.52	141.05	130.51	133.98	132.51
P3 (2071-2099)	4.5	132.88	134.15	133.03	135.27	133.83
	8.5	117.89	114.78	140.67	144.34	129.42

As projeções climáticas de temperatura e precipitação média mensal apontam, no geral, para aumento ao longo do século XXI. Sob o RCP 4.5, os resultados do *Ensemble Mean* mostraram um aumento médio de 1,2°C na temperatura média mensal, enquanto que no RCP 8.5 apresentou um aumento médio de 2,08°C (

Tabela 8). Considerando as três bacias, os aumentos na temperatura variaram de 0,08°C (ETA-BESM) a 2,52°C (ETA-CANESM2) sob o RCP 4.5 e de 0,58°C (ETA-BESM) a 4,13°C (ETA-CANESM2) sob o RCP 8.5.

Em relação à precipitação média mensal (Tabela 9), as projeções do *Ensemble Mean* mostraram, para todo o período futuro, aumento de 11,66% e 9,29% para os RCPs 4.5 e 8.5, respectivamente. Neto et al. (2016) concluíram que a disponibilidade de água mostra redução projetada em quase todo o país, exceto no sul do Brasil, corroborando com este estudo. É importante destacar que, para o P3 - RCP 8.5, o ETA-BESM e o ETA-CANESM2 apresentaram reduções nas precipitações variando de, em média, -5,54 a -2,57%, ou seja, indicando reduções nas precipitações quando considerado o final do século.

Os aumentos de precipitação simulados pelos MCRs variaram de 4,20% (ETA-HADGEM2) a 15,65% (ETA-CANES2) no RCP 4.5 e de 1,02% (ETA-HADGEM2) a 22,94% (ETA-HADGEM2) no RCP 8.5. De acordo com Chou et al. (2014), o ETA-HadGEM2 é mais sensível ao aumento de gases de efeito estufa, o que pode ser ainda observado na

Tabela 8, onde apresenta as maiores temperaturas médias mensais, para a maioria dos casos apresentados.

No trabalho de Chou et al. (2014) este comportamento é semelhante e, comparando o ETA-HADGEM2 com o ETA-MIROC5, os autores encontraram que o ETA-MIROC5 atinge um aquecimento de cerca de 1,5°C e 2°C e o aquecimento das simulações ETA-HADGEM2 atinge cerca de 4°C. Com relação à precipitação, Chou et al. (2014) mostram que as simulações conduzidas pelo ETA-MIROC5 produzem mais precipitação do que o ETA-HADGEM2 durante a estação chuvosa e geralmente menos durante a estação seca, portanto, o ETA-MIROC5 exibe uma amplitude maior do ciclo anual de precipitação para ambos os RCPs.

Alvarenga et al. (2018) mostraram que ambos os cenários (RCP 4.5 e RCP 8.5) apresentaram prognósticos de aumento na temperatura média do ar sazonal e os impactos simulados no cenário RCP 8.5 são maiores, com um aumento da temperatura acima de 5°C até o final do século XXI, em todas as estações. Além disso, neste mesmo estudo, os autores concluíram que o verão apresentou maior impacto, indicando um aumento de temperatura superior a 6°C e considerando o cenário RCP 4.5, houve aumentos de temperatura entre 2,0°C e 3,0°C, nas quatro estações do ano. Em relação à precipitação projetada, os autores não encontraram uma tendência clara no outono, inverno e primavera para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, mas um sinal de redução no verão nos dois cenários até o final do século.

4.4. Avaliação do hidrograma e indicadores hidrológicos para o clima passado

De posse dos hidrogramas mensais nas seções de controle da BHAF e BHAP, estes foram comparados com os hidrogramas mensais gerados pelo modelo hidrológico SWAT forçado por dados dos modelos climáticos regionalizados pelo modelo ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HADGEM2, com o intuito de analisar os indicadores hidrológicos a partir da avaliação da capacidade de as simulações hidrológicas forçadas pelas simulações de dados climáticos representarem as vazões observadas.

Na BHAF e BHAP, as análises para o clima passado (CP) – ou baseline (1961 a 2005) dos modelos climáticos – foram realizadas para o período de 1965 a 2005 devido à existência de dados observados a partir de meados do ano de 1964. Já para a BHRP esta análise não foi possível, visto que os dados diários

observados somente estão disponíveis a partir do ano de 2007. Considerando o CP, as vazões médias mensais, a média aritmética das vazões médias mensais (*Ensemble Mean*) simuladas pelo modelo hidrológico SWAT forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HADGEM2, e as vazões médias observadas na seção de controle da BHAF e BHAP, estão apresentadas na Figura 23. A Tabela 10 apresenta os erros na estimativa das vazões médias mensais (PBIAS, %) e o erro médio (PBIAS médio, %) entre os meses do ano para as mesmas bacias.

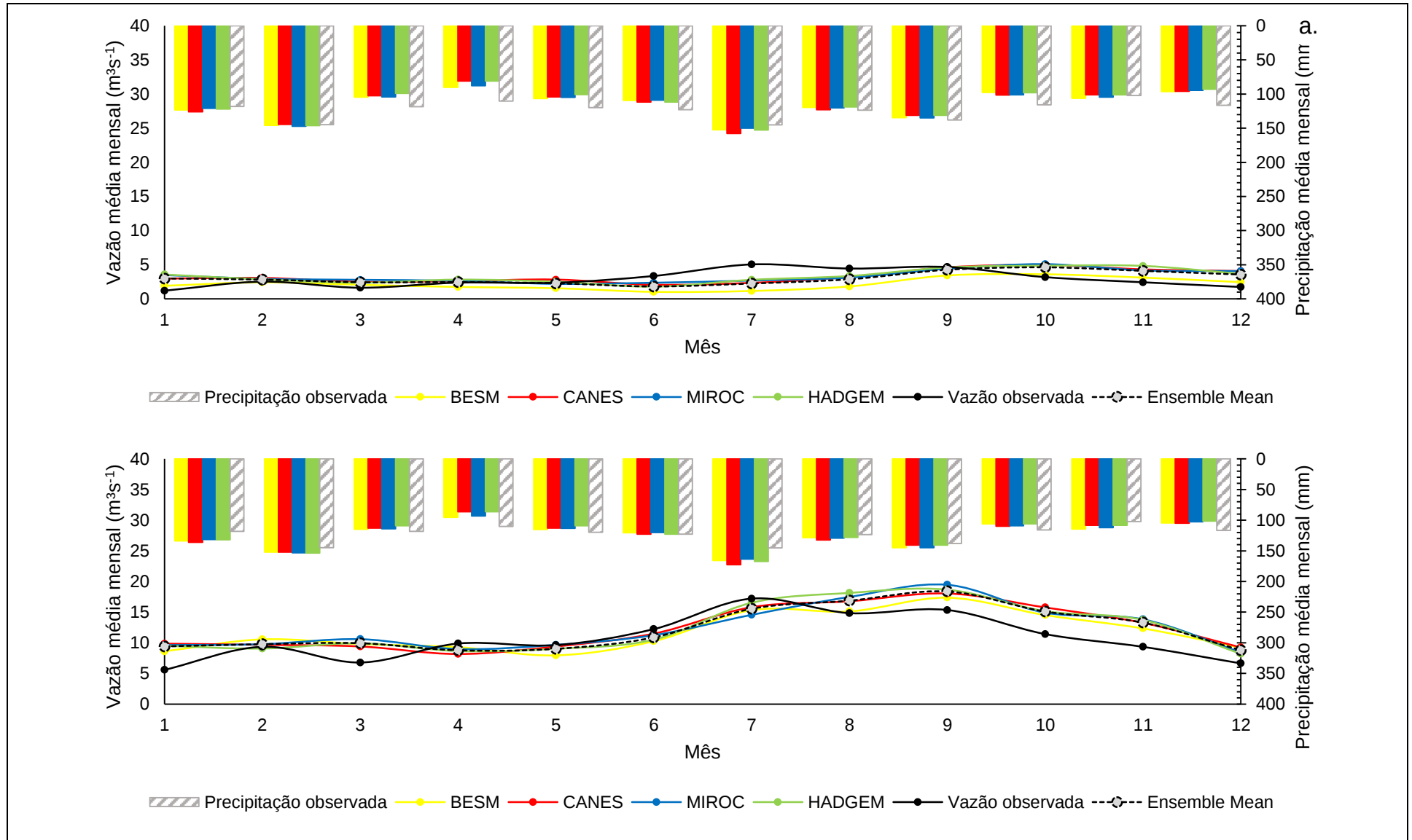


Figura 23 - Vazões médias mensais observadas, vazões médias mensais simuladas pelo modelo SWAT forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HADGEM2, média das vazões simuladas (ensemble mean), precipitação média mensal considerando os dados observados da estação de monitoramento de chuva “Ponte Cordeiro de Farias”, precipitação média simulada pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HADGEM2 (nas mesmas cores) para o período de 1965 a 2005 considerando as bacias hidrográficas do arroio Fragata (BHAF) (a) e do arroio Pelotas (BHAP) (b).

Tabela 10 - Erro na estimativa das vazões médias mensais (PBIAS, %) entre os dados observados e simulados e o erro médio (PBIAS médio, %) entre os meses do ano para as bacias hidrográficas do arroio Fragata (BHAF) e do arroio Pelotas (BHAP), considerando o período de 1965 a 2005

Mês	ETA-BESM		ETA-CANES2M		ETA-MIROC5		ETA-HadGEM2		Ensemble Mean	
	BHAF	BHAP	BHAF	BHAP	BHAF	BHAP	BHAF	BHAP	BHAF	BHAP
Jan	-60.42	-54.22	-147.05	-76.58	-190.82	-72.48	-198.38	-70.27	-149.17	-68.39
Fev	3.76	-12.94	-21.36	-3.36	-15.97	-4.57	-14.00	3.04	-11.89	-4.46
Mar	-26.55	-44.35	-52.53	-38.57	-70.36	-56.19	-46.22	-46.27	-48.92	-46.34
Abr	26.08	6.03	-9.22	17.31	-10.44	9.04	-19.17	12.36	-3.19	11.18
Mai	33.77	17.44	-19.04	2.42	7.55	-0.48	-6.60	6.25	3.92	6.41
Jun	68.93	16.16	38.91	6.02	30.06	8.07	46.07	14.00	45.99	11.06
Jul	76.79	10.86	53.80	8.03	47.07	15.38	44.45	3.88	55.53	9.54
Ago	58.89	-1.93	28.45	-13.19	30.03	-17.81	24.39	-22.27	35.44	-13.80
Set	26.72	-13.21	1.21	-17.71	5.44	-26.83	1.31	-21.71	8.67	-19.87
Out	-12.62	-27.28	-56.12	-38.18	-59.51	-30.62	-52.49	-32.84	-45.19	-32.23
Nov	-28.03	-32.20	-77.49	-41.95	-71.34	-48.08	-98.72	-47.06	-68.90	-42.33
Dez	-41.06	-38.47	-134.20	-39.30	-133.65	-27.13	-111.70	-23.64	-105.15	-32.14
Erro médio	10.52	-14.51	-32.89	-19.59	-36.00	-20.98	-35.92	-18.71	-23.57	-18.45

A partir da Figura 23 é possível verificar que existe subestimativa das vazões médias mensais pelo ETA-BESM, comparada aos demais modelos climáticos. Apesar disso, todos apresentam o comportamento semelhante ao longo dos meses, sendo assim, condizentes entre si. Com relação à acurácia dos modelos (Tabela 10), de modo geral, para a BHAF, as vazões médias mensais simuladas pelo modelo hidrológico SWAT e forçado pelo modelo ETA-BESM foram as que mais se aproximaram, de modo geral, das vazões médias mensais observadas, com PBIAS médio de 10,52%, seguido do modelo ETA-CANESM2 (-32,89%), ETA-HADGEM2 (-35,98%), do modelo ETA-MIROC5 (-36,00%) e, para o *Ensemble Mean*, o PBIAS médio foi de -23,57%.

Para a BHAP, os resultados de PBIAS médios (Tabela 10) para todos os modelos climáticos indicam a superestimativa das vazões médias mensais. Estas vazões foram melhor estimadas pelo modelo hidrológico forçado pelo ETA-BESM (-14,51%), seguido do modelo ETA-HADGEM2 (-18,71%), modelo ETA-CANESM2 (-19,59%) e do modelo ETA-MIROC5 (-20,98%). Da mesma forma que na BHAF, as vazões médias mensais simuladas pelo modelo SWAT forçado pelos dados climáticos do ETA-BESM ficaram mais próximas das vazões médias mensais observadas.

Ao analisar a Tabela 10, pode-se constatar que, para a BHAF, alguns meses apresentaram superestimativa pelos modelos climáticos, enquanto que outros, apresentaram subestimativa. Para todos os modelos climáticos, com exceção do mês de fevereiro do ETA-BESM (3,76%), as vazões médias mensais observadas na BHAF foram superestimadas para o primeiro trimestre (Janeiro, Fevereiro e Março) e para o último trimestre (Outubro, Novembro e Dezembro). Diferente da superestimativa, a subestimativa na BHAF, ainda considerando a Figura 23a e a Tabela 10, foi observada nos meses de Junho e Julho para todos os modelos, acrescido dos meses de Abril, Maio, Agosto e Setembro para o modelo ETA-BESM, dos meses de Agosto e Setembro para o modelo ETA-CANESM2, dos meses Maio, Agosto e Setembro para o modelo ETA-MIROC5 e dos meses de Agosto e Setembro para o ETA-HADGEM2. Para o *Ensemble Mean* (Tabela 10) indicam que a superestimativa das vazões médias mensais ocorre nos meses de verão (Dezembro, Janeiro e Fevereiro), seguido dos meses de Março, Abril, Outubro e Novembro. Já a subestimativa das vazões ocorre no inverno (Junho, Julho e Agosto), seguido dos meses de Maio e Setembro.

Considerando a Figura 23b, pode-se constatar que o comportamento da vazão observada na BHAP foi melhor representado pelos modelos climáticos quando comparado ao comportamento simulado pelos modelos na BHAF (Figura 23b). Esta constatação ainda pode ser verificada na Tabela 10, onde, considerando as simulações realizadas pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HADGEM2, os PBIAS são menores na BHAP para a maioria dos meses. Na Tabela 10 também é possível verificar que houve superestimativa das vazões médias mensais na BHAP no primeiro trimestre de todos os modelos climáticos - exceto para o mês de Fevereiro com o uso do modelo ETA-HADGEM2 (3,04%). Já a subestimativa na BHAP (Tabela 10) foi encontrada nos meses de Abril, Maio, Junho e Julho para todos os modelos – exceto para o modelo ETA-MIROC5 no mês de Maio (-0,48%).

Quando analisado os resultados do *Ensemble Mean* para a BHAP (Tabela 10), pode-se constatar que o comportamento de superestimativa das vazões médias mensais, da mesma forma que na BHAF, também foi encontrado para o verão. Valores de acréscimo na vazão também foram encontrados para a primavera (Setembro, Outubro e Novembro) e para os meses de Março e Agosto. Já a

subestimativa foi encontrada para meses de Outono e Inverno, exceto para os meses de Março e Agosto. Além disso, da mesma forma que na BHAF, todos os modelos climáticos apresentam comportamento semelhante, sendo, consequentemente, condizentes, tanto para as vazões mais baixas quanto para as vazões mais altas.

Com o objetivo de avaliar se a precipitação simulada por cada modelo climático é condizente com o que foi observado na estação pluviométrica, a Figura 23 também apresenta as médias mensais de precipitação considerando os dados observados da estação de monitoramento de chuva “Ponte Cordeiro de Farias”, a precipitação média simulada pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HADGEM2, considerando o período de 1965 a 2005. É importante destacar que apesar de comparar pontos de grade com dados de apenas um ponto de observação e a chuva variar no espaço, a sua magnitude ao longo do tempo, em escala mensal e anual, deve ser bastante próxima entre a estação e os dados dos modelos.

Para analisar a variação sazonal das vazões, é importante destacar o padrão de chuvas do Estado do Rio Grande do Sul. De acordo com Reboita et al. (2010), o padrão de chuvas do estado é majoritariamente controlado por sistemas frontais que atingem o território brasileiro, resultando em chuvas bem distribuídas ao longo do ano. Porém, de acordo com o mesmo autor, durante o inverno (de junho a agosto) a faixa oriental do estado recebe uma contribuição importante da umidade do Oceano Atlântico, culminando em aumento na quantidade de chuvas neste período do ano, tendendo a aumentar as vazões em bacias situadas a leste. Segundo Cassalho et al. (2019), a maioria das grandes inundações ocorre entre o inverno e o início da primavera, sugerindo um padrão de inundação homogêneo em todo o Rio Grande do Sul. Assim, o comportamento hidrológico das bacias hidrográficas consideradas neste estudo é influenciado por essa dinâmica do regime de chuva da região.

O período em que ocorreu as maiores subestimativas das vazões médias mensais observadas pelas vazões médias simuladas pelo SWAT forçado pelos modelos climáticos na BHAF (Tabela 10) compreende àquele caracterizado por período úmido (meses de inverno). Este fato pode indicar que o SWAT, quando forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e

ETA-HADGEM2, não simula corretamente o comportamento das vazões no período úmido para a BHAF, ou seja, quando as vazões médias mensais observadas são mais elevadas. Esta situação se repete em uma magnitude menor quando consideradas as vazões médias mensais na BHAP simuladas para o período úmido, porém se difere para o mês de Agosto, o qual apresenta superestimativa neste período para todos os modelos.

Como resultado do estudo de Caldeira (2019), as vazões simuladas foram subestimadas quando comparadas às vazões médias mensais observadas, porém, quando analisada a variação sazonal das vazões, foi notório que o regime hidrológico da BHAP, em termos de ocorrência de períodos úmidos e secos ao longo do ano, foi bem representado quando o modelo LASH foi forçado pelos dados do clima passado dos 4 MCG's regionalizados pelo Eta. A autora também verificou que as simulações, forçadas pelos diferentes modelos climáticos, concordam entre si para os meses em que ocorrem vazões mais baixa e divergem na tentativa de reproduzir vazões mais elevadas.

De acordo com Chen et al. (2013), mesmo usando dados de precipitação corrigidos por viés, o uso de MCGs combinados com MCRs para avaliações de impacto hidrológico pode ser incapaz de reproduzir vazões observadas adequadamente em alguns casos. Além disso, segundo Teutschbein e Seibert (2010), as diferenças entre as vazões observadas e as vazões simuladas nas avaliações de impactos das mudanças climáticas são comuns, uma vez que o uso dos dados do MCR como entrada geralmente não é capaz de reproduzir satisfatoriamente o fluxo sazonal de longo prazo observado, apresentando desvios tanto no tempo quanto na magnitude.

Esse comportamento dos modelos pode ser atribuído a várias incertezas existentes nos estudos de mudanças climáticas, como estruturas de modelos MCG/MCR, cenários de emissão, parametrização, métodos de redução de escala e incertezas relacionadas aos modelos hidrológicos (OLIVEIRA et al. 2019). De acordo com Vetter et al. (2017), os MCGs são as maiores fontes de incertezas nos estudos de impacto hidrológico, seguidos pelas emissões cenários e modelos hidrológicos. No entanto, pouca atenção tem sido dada à incerteza da estrutura do modelo hidrológico e a não consideração das mudanças no uso do solo (KARLSSON et al. 2016). No caso do presente estudo, pode-se observar um

desempenho satisfatório do SWAT para simular as vazões, porém, fica a indicação da importância de levar em consideração a mudança do uso do solo ao longo do tempo para futuros estudos.

Adicionalmente às análises apresentadas, a Figura 24 apresenta a curva de permanência da BHAF e da BHAP considerando a vazão média mensal observada em cada seção de controle e a vazão média simulada pelo SWAT forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HADGEM2.

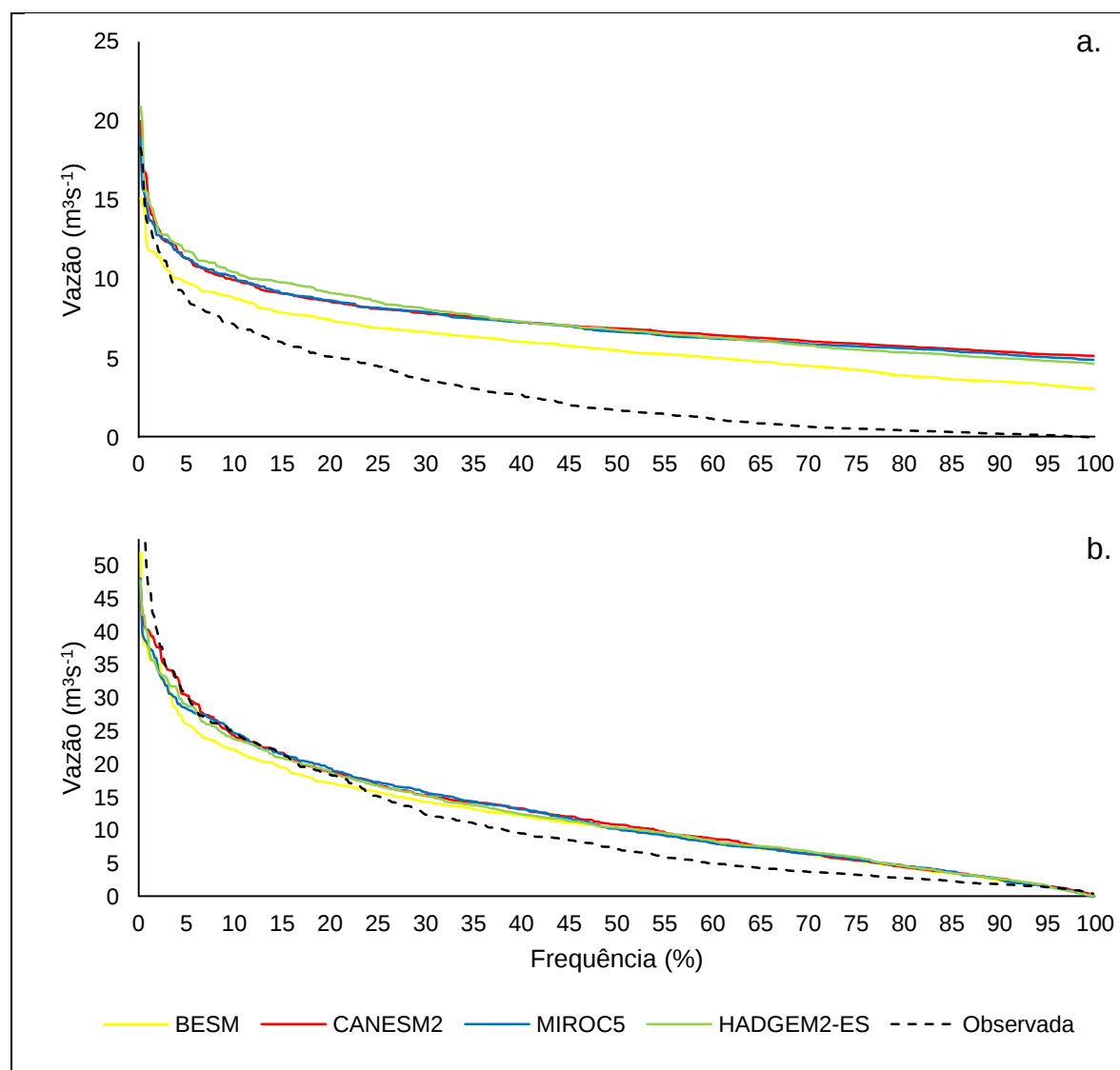


Figura 24 – Curvas de permanência de vazões médias mensais observadas e simuladas pelo modelo hidrológico SWAT forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HADGEM2 para as bacias hidrográficas do arroio Fragata (a) e do arroio Pelotas (b), considerando o período de clima passado (1965 a 2005).

Para a BHAF, de forma geral, as vazões médias mensais estimadas pelo modelo SWAT forçado pelos modelos climáticos foram superestimadas para a

maioria das frequências (Figura 24a). Este comportamento é observado de forma diferente na BHAP (Figura 24b), onde a superestimativa é melhor notada a partir das vazões médias mensais de 25% de frequência. Para melhor entender a capacidade dos modelos climáticos em simular tanto vazões altas quanto vazões baixas, foram utilizados cinco pontos de percentil (Q_5 , Q_{25} , Q_{50} , Q_{75} e Q_{95}) para a BHAF e para BHAP (Tabela 11), com intuito de dividir a curva de permanência de vazões em seis intervalos.

Tabela 11 – Desempenho do modelo hidrológico SWAT forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HADGEM2 em simular as vazões médias mensais nas bacias hidrográficas do arroio Fragata (BHAF) e do arroio Pelotas (BHAP) com base em seis intervalos de percentil ($<Q_5$, Q_5 - Q_{25} , Q_{25} - Q_{50} , Q_{50} - Q_{75} , Q_{75} - Q_{95} e $\geq Q_{95}$) considerando o coeficiente de correlação (R) e o erro relativo na estimativa das vazões (PBIAS,%) e a vazão ($Q, m^3 s^{-1}$) do intervalo superior de percentil para cada modelo climático (Q_5 , Q_{25} , Q_{50} , Q_{75} , Q_{95})

Percentil	Modelo	BHAF			BHAP		
		R	PBIAS	Q	R	PBIAS	Q
$<Q_{5\%}$	ETA-BESM	0.97	22.46	7.56	0.87	16.50	26.12
	ETA-CANESM2	0.98	9.15	9.02	0.95	11.14	29.55
	ETA-MIROC5	0.96	11.41	8.74	0.94	14.81	28.54
	ETA-HADGEM2	0.98	7.75	9.55	0.98	12.84	29.15
Q_5 - $Q_{25\%}$	ETA-BESM	0.99	16.34	3.57	0.99	7.13	16.17
	ETA-CANESM2	0.99	-8.85	5.30	0.99	0.22	16.36
	ETA-MIROC5	0.99	-8.19	5.12	0.99	-2.65	17.33
	ETA-HADGEM2	0.99	-6.03	5.04	0.99	-0.69	16.88
Q_{25} - $Q_{50\%}$	ETA-BESM	0.99	28.13	1.08	0.99	-23.27	10.46
	ETA-CANESM2	1.00	-34.72	2.70	0.97	-27.35	10.80
	ETA-MIROC5	0.99	-32.53	2.72	0.99	-31.24	10.31
	ETA-HADGEM2	1.00	-29.93	2.75	0.99	-26.42	10.36
Q_{50} - $Q_{75\%}$	ETA-BESM	0.99	45.35	0.25	0.99	-62.80	5.45
	ETA-CANESM2	0.99	-29.13	0.64	0.96	-65.61	5.48
	ETA-MIROC5	1.00	-48.65	0.77	0.99	-62.72	5.70
	ETA-HADGEM2	0.99	-64.52	0.84	0.99	-66.79	6.06
Q_{75} - $Q_{95\%}$	ETA-BESM	1.00	58.42	0.08	0.99	-53.74	1.77
	ETA-CANESM2	0.98	15.62	0.12	0.99	-53.80	1.52
	ETA-MIROC5	0.99	-3.99	0.16	0.99	-58.81	1.57
	ETA-HADGEM2	0.98	-7.49	0.15	1.00	-60.08	1.59
$\geq Q_{95}$	ETA-BESM	0.99	45.86		0.99	2.99	
	ETA-CANESM2	0.96	21.64		0.99	5.68	
	ETA-MIROC5	0.99	-0.54		0.99	19.29	
	ETA-HADGEM2	0.98	1.19		0.98	17.94	

Em geral, considerando os resultados de R (Tabela 11) para a BHAF e para a BHAP e a Figura 24, ambas as bacias apresentaram resultados satisfatórios, com

valores muito próximos ou iguais a 1. É pertinente mencionar que valores de R próximos ou iguais a 1 não significam necessariamente que foi bom e sim que houve um padrão ou de super ou de subestimativa. Com base nos resultados de PBIAS (Tabela 11), as vazões simuladas pelo modelo hidrológico SWAT forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HADGEM2 que apresentaram melhor desempenho tanto para a BHAF, quanto para a BHAP, em média (1,68% para a BHAF e 1,01% para a BHAP), foram as vazões pertencentes ao intervalo de Q_5 - Q_{25} , ou seja, aquelas classificadas como vazões moderadamente altas que apresentaram frequência maiores ou igual a 5% e menores que 25%.

De modo contrário, o pior desempenho, em média (24,24% para a BHAF e 64,48% para a BHAP) (Tabela 11), foi observado para as vazões simuladas correspondentes ao intervalo Q_{50} - Q_{75} , classificadas como vazões normais baixas, para ambas as bacias. Também é importante destacar que as estimativas dos extremos, ou seja, as vazões consideradas mais altas ($<Q_5$) e as vazões consideradas mais baixas ($\geq Q_{95}$), tiveram acurácia satisfatória para ambas as bacias.

Com relação às vazões de referência observadas na BHAF, Q_5 ($8,81\text{m}^3.\text{s}^{-1}$), Q_{25} ($4,51\text{m}^3.\text{s}^{-1}$), Q_{50} ($1,79\text{m}^3.\text{s}^{-1}$), Q_{75} ($0,60\text{m}^3.\text{s}^{-1}$) e Q_{95} ($0,19\text{m}^3.\text{s}^{-1}$), todas foram subestimadas para o modelo ETA-BESM. A subestimativa das vazões de referência observadas também é encontrada para todos os modelos climáticos quando analisada a Q_{95} . Para a BHAP a situação se difere, as vazões de referência observadas são subestimadas por todos os modelos climáticos quando considerada a Q_5 . De modo contrário, as vazões são superestimadas por todos os modelos para o restante das vazões de referência analisadas (Q_{25} , Q_{50} , Q_{75} , Q_{95}).

4.5. Impacto das mudanças climáticas sobre os indicadores hidrológicos

De posse dos hidrogramas mensais simulados pelo SWAT forçados pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HADGEM2, foi possível analisar os impactos das mudanças climáticas usando indicadores (vazão média mensal, vazão média anual, vazão média de enchente (Q_{me}), vazão máxima anual, vazão mínima anual e produção de água) considerando os RCPs 4.5 e 8.5. Estas análises foram realizadas para os três períodos futuros: 2006 a

2040, 2041 a 2070 e 2071 a 2099, denominados como P1, P2 e P3, respectivamente.

4.5.1. Vazões médias

As vazões médias mensais obtidas dos hidrogramas mensais simulado pelo SWAT validado forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HADGEM2 e o *Ensemble Mean*, para o CP e para P1, P2 e P3, considerando as projeções futuras dos RCPs 4.5 e 8.5, podem ser visualizadas na Figura 25, Figura 26 e na Figura 27, para a BHAF, BHAP e BHRP, nesta ordem. A variação em relação ao CP, os valores de vazão média mensal e o *Ensemble Mean* para os períodos futuros estão apresentados na Figura 28, Figura 29 e Figura 30 para BHAF, BHAP e BHRP, respectivamente.

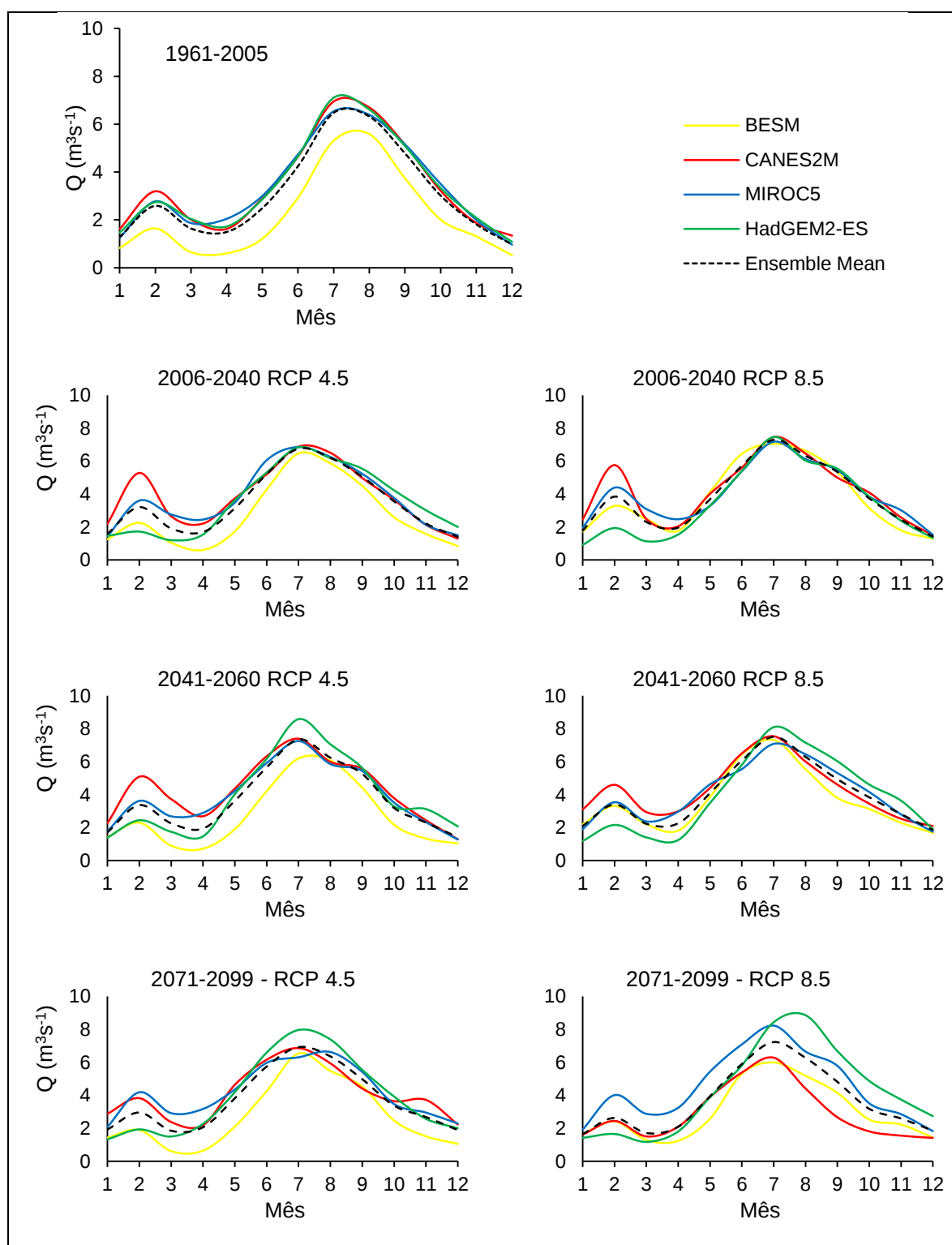


Figura 25 - Vazões médias mensais extraídas dos hidrogramas mensais simulados pelo SWAT forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HADGEM2 para o clima passado (1961 a 2005) e para as projeções futuras de 2006 a 2040, 2041 a 2070 2071 a 2099 e Ensemble Mean, considerando os RCPs 4.5 e 8.5 para todos os cenários na bacia hidrográfica do arroio Fragata (BHAf).

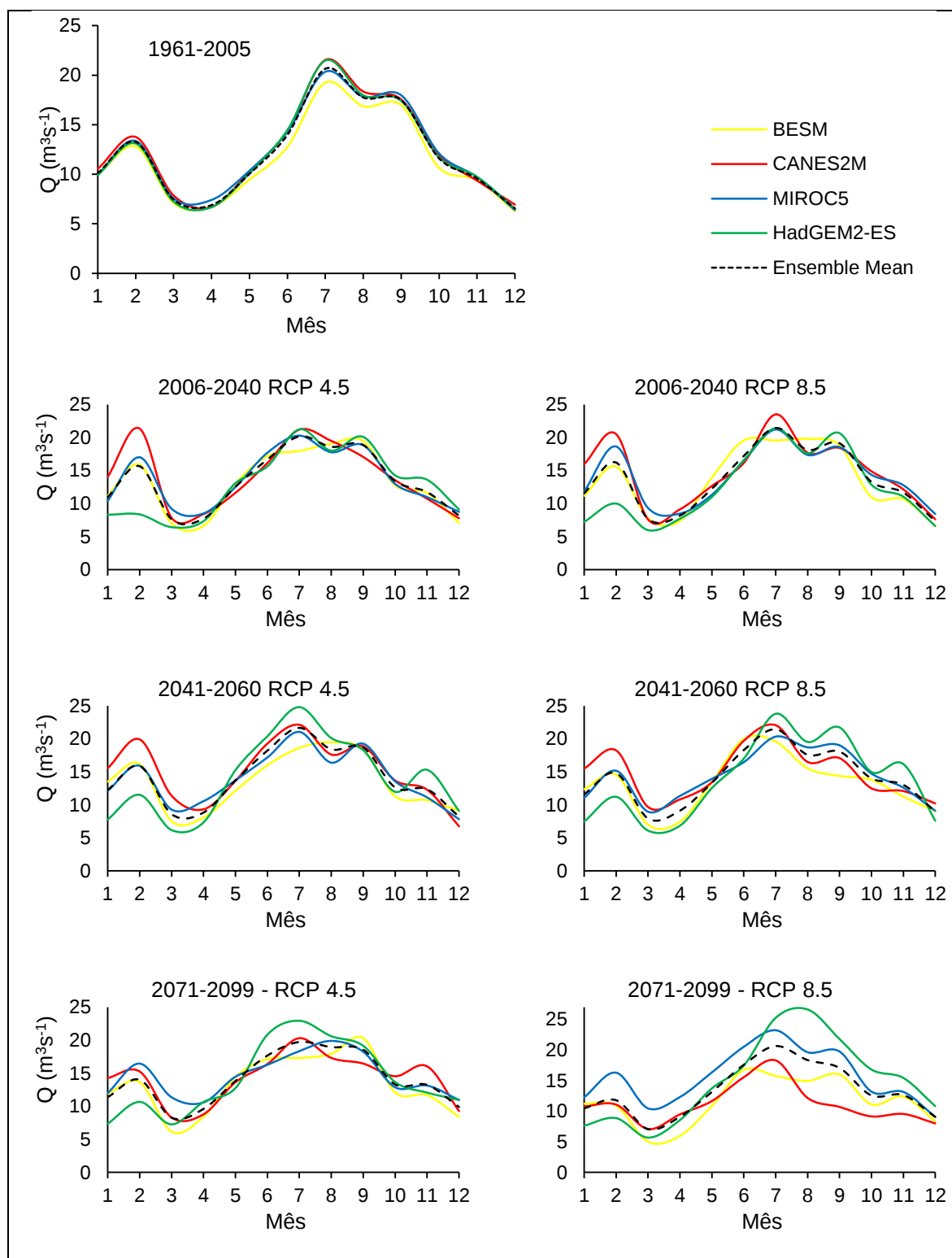


Figura 26 - Vazões médias mensais extraídas dos hidrogramas mensais simulados pelo SWAT forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HADGEM2 para o clima passado (1961 a 2005) e para as projeções futuras de 2006 a 2040, 2041 a 2070, 2071 a 2099 e Ensemble Mean, considerando os RCPs 4.5 e 8.5 para todos os cenários na bacia hidrográfica do arroio Pelotas (BHAP).

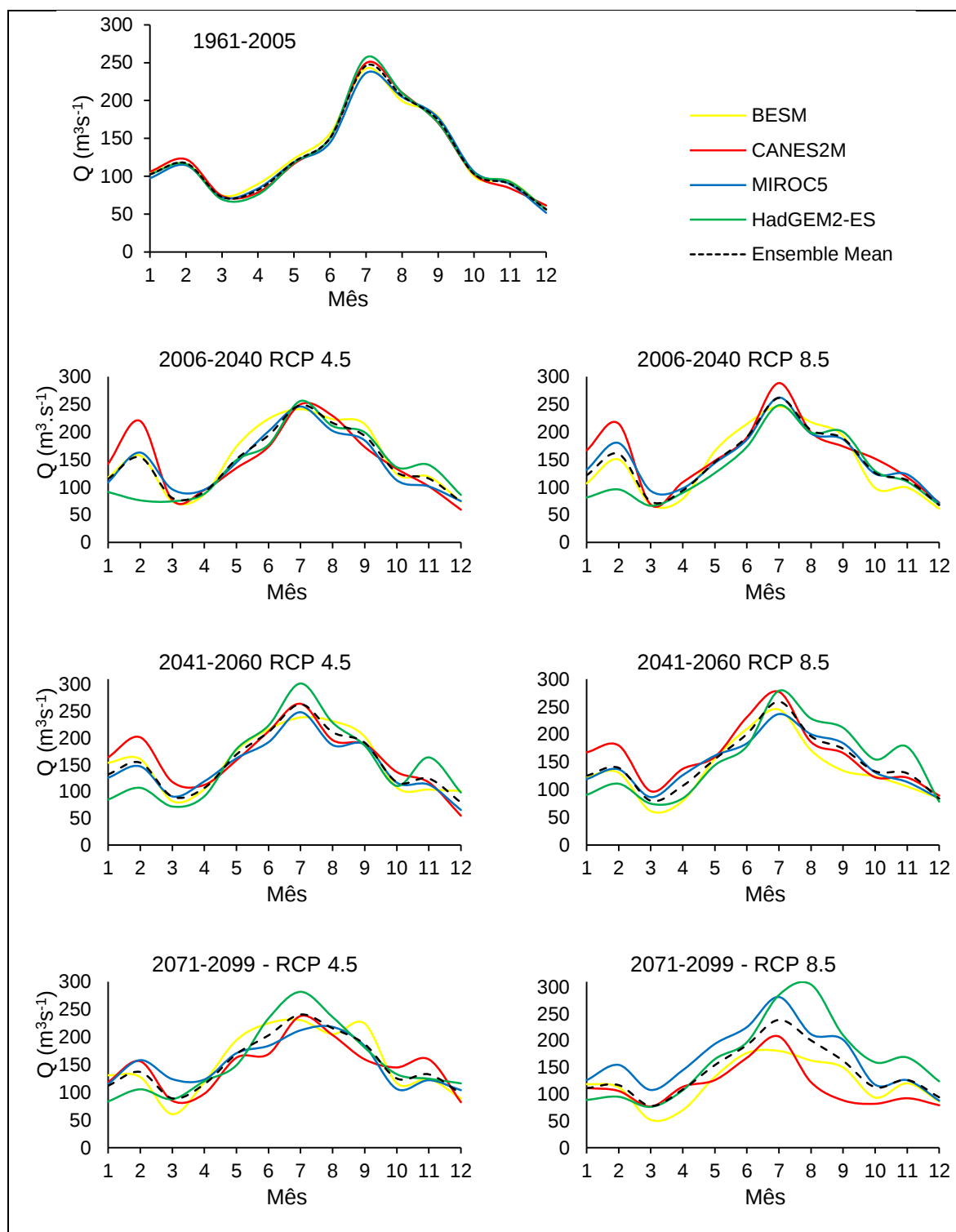


Figura 27 - Vazões médias mensais extraídas dos hidrogramas mensais simulados pelo SWAT forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HADGEM2 para o clima passado (1961 a 2005) e para as projeções futuras de 2006 a 2040, 2041 a 2070, 2071 a 2099 e Ensemble Mean, considerando os RCPs 4.5 e 8.5 para todos os cenários na bacia hidrográfica do rio Piratini (BHRP).



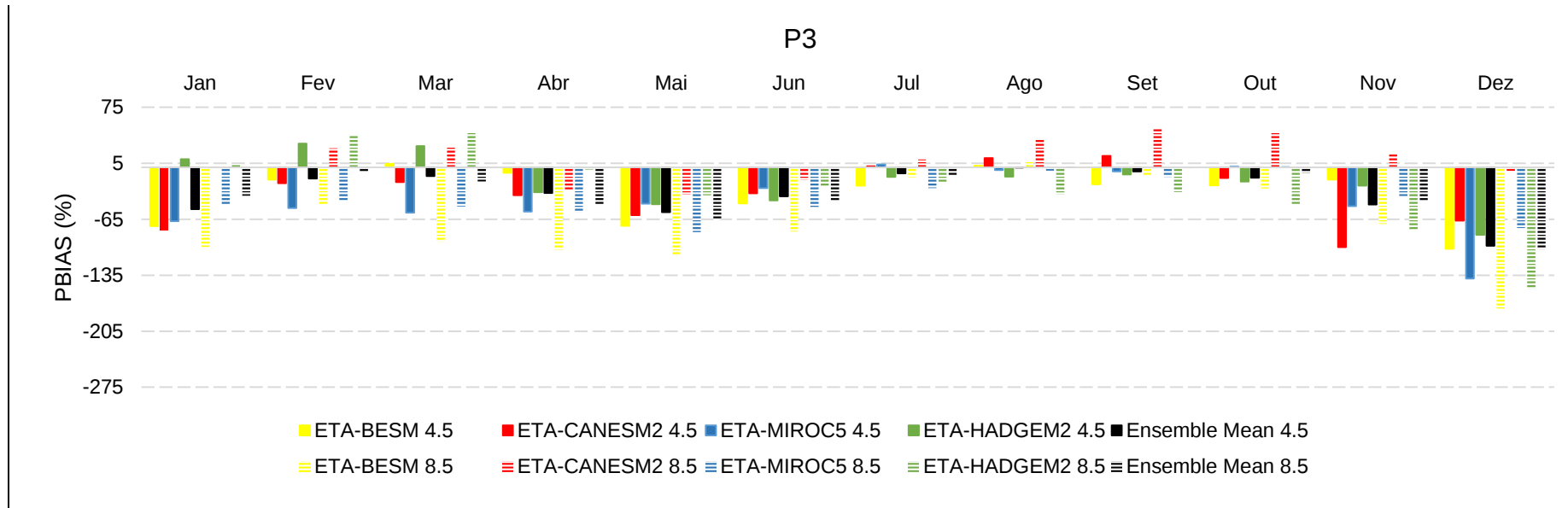
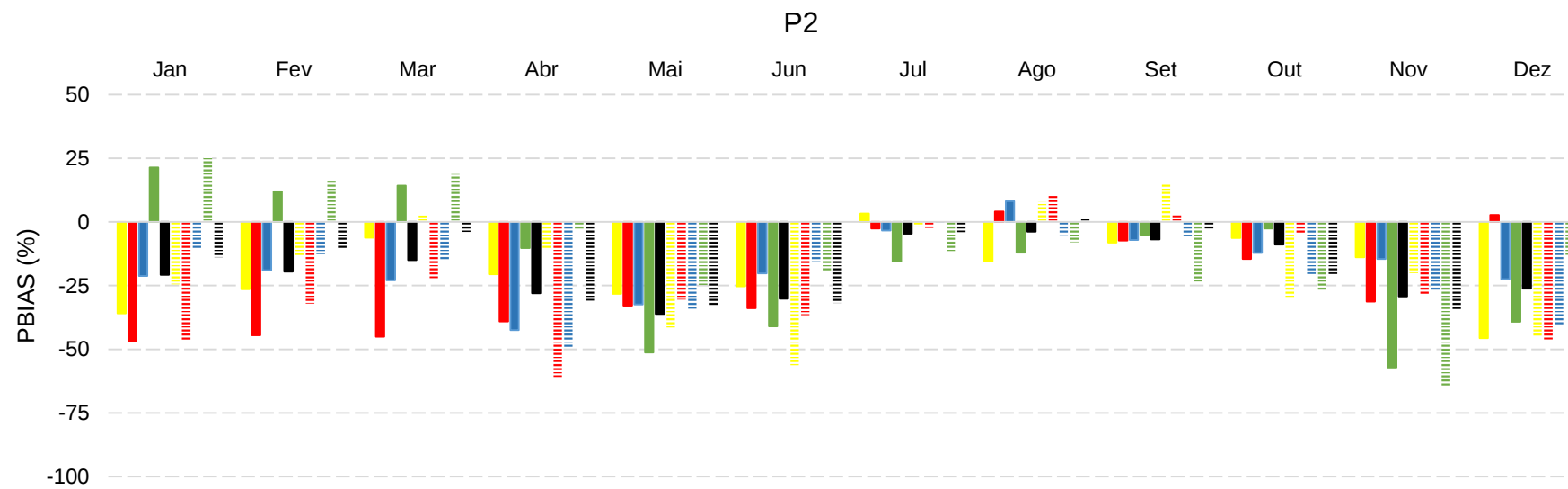
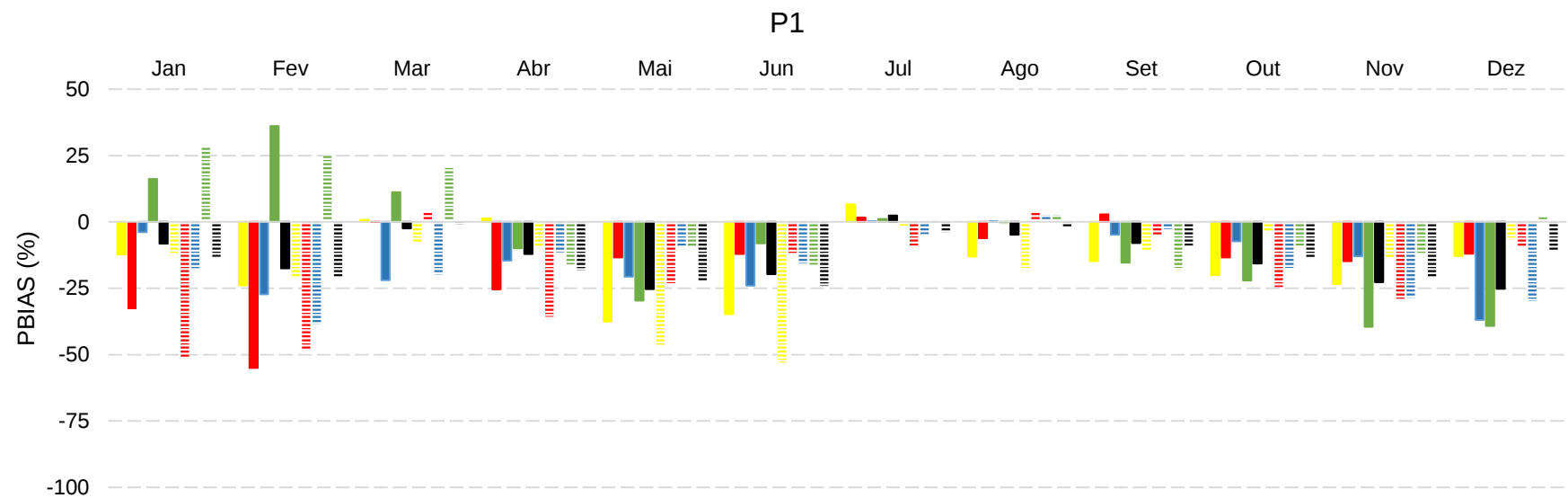


Figura 28 - Variação entre as vazões médias mensais extraídas dos hidrogramas mensais simulados pelo SWAT forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HADGEM2 para os RCPs 4.5 e 8.5, e as vazões extraídas dos hidrogramas mensais simulados pelo SWAT forçado pelo clima passado, para a bacia hidrográfica do arroio Fragata (Bhaf) considerando os cenários futuros (P1, P2 e P3)



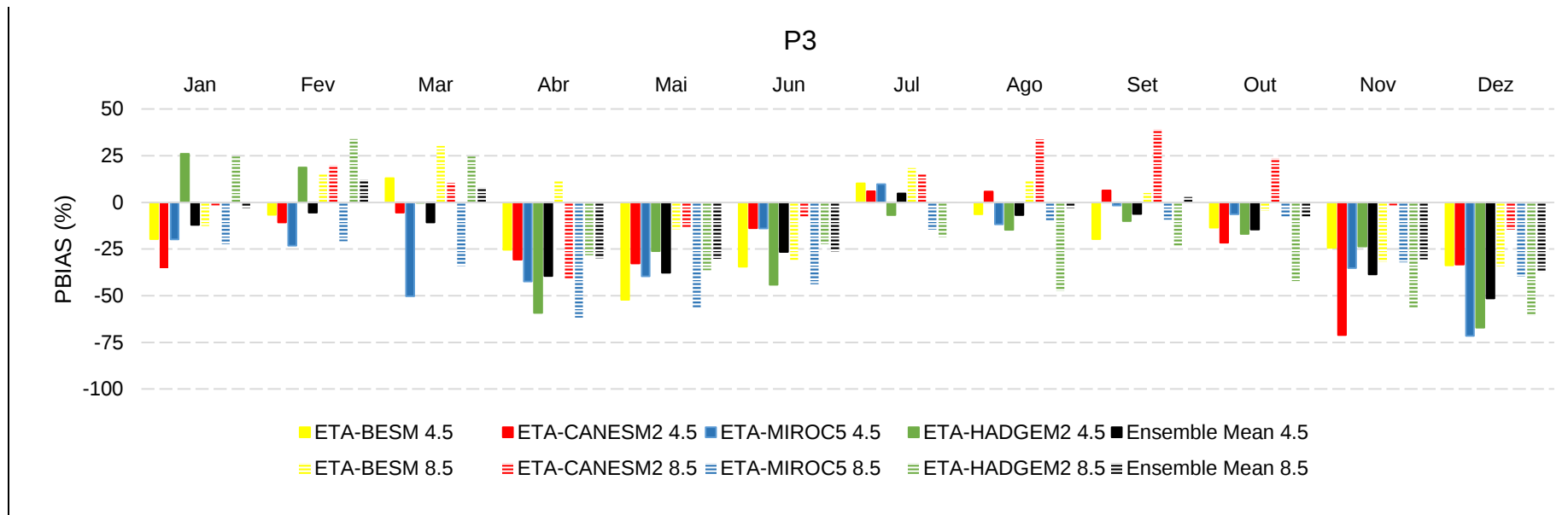
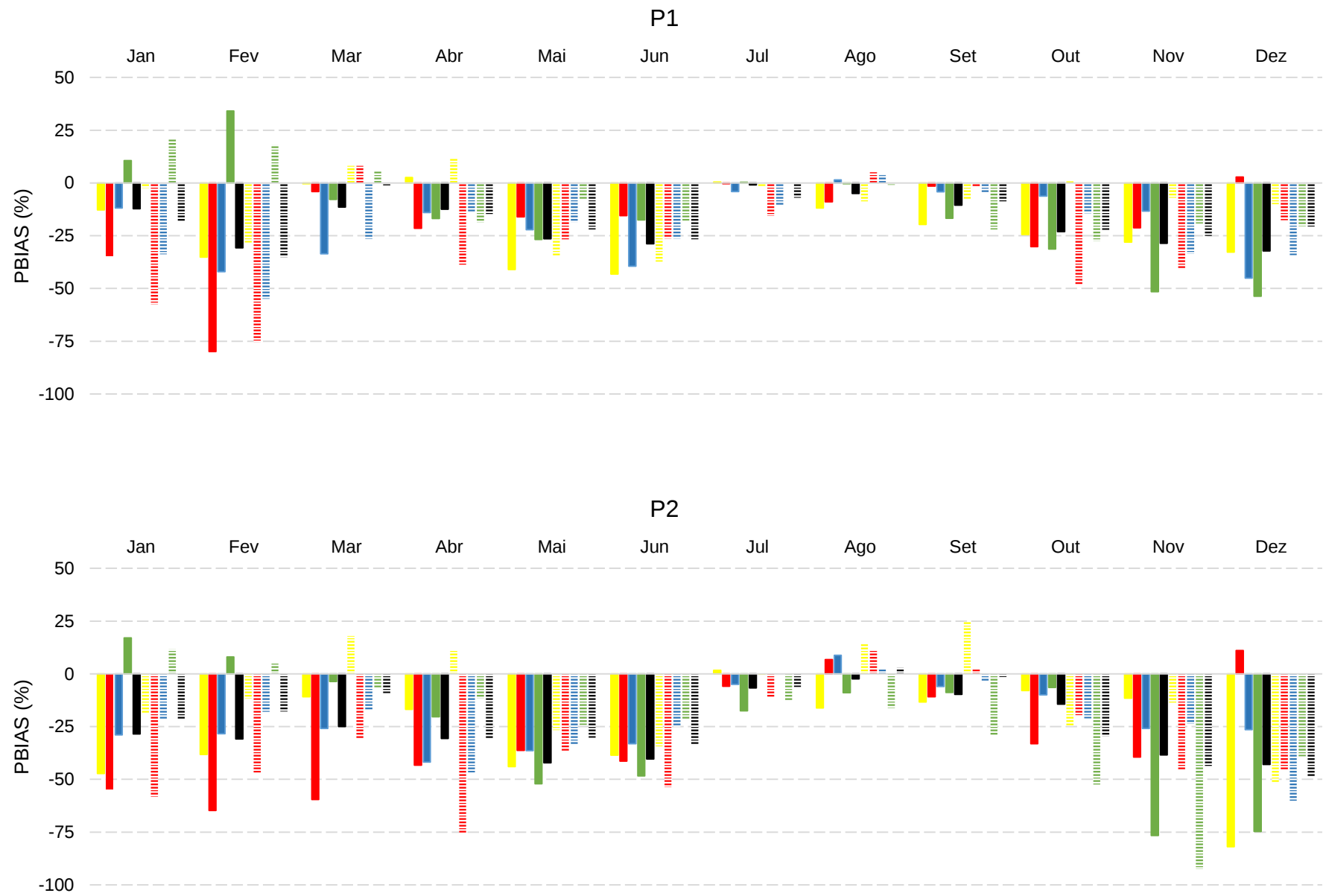


Figura 29 - Variação entre as vazões médias mensais extraídas dos hidrogramas mensais simulados pelo SWAT forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HADGEM2 para os RCPs 4.5 e 8.5, e as vazões extraídas dos hidrogramas mensais simulados pelo SWAT forçado pelo clima passado, para a bacia hidrográfica do arroio Pelotas (BHAP) considerando os cenários futuros (P1, P2 e P3)



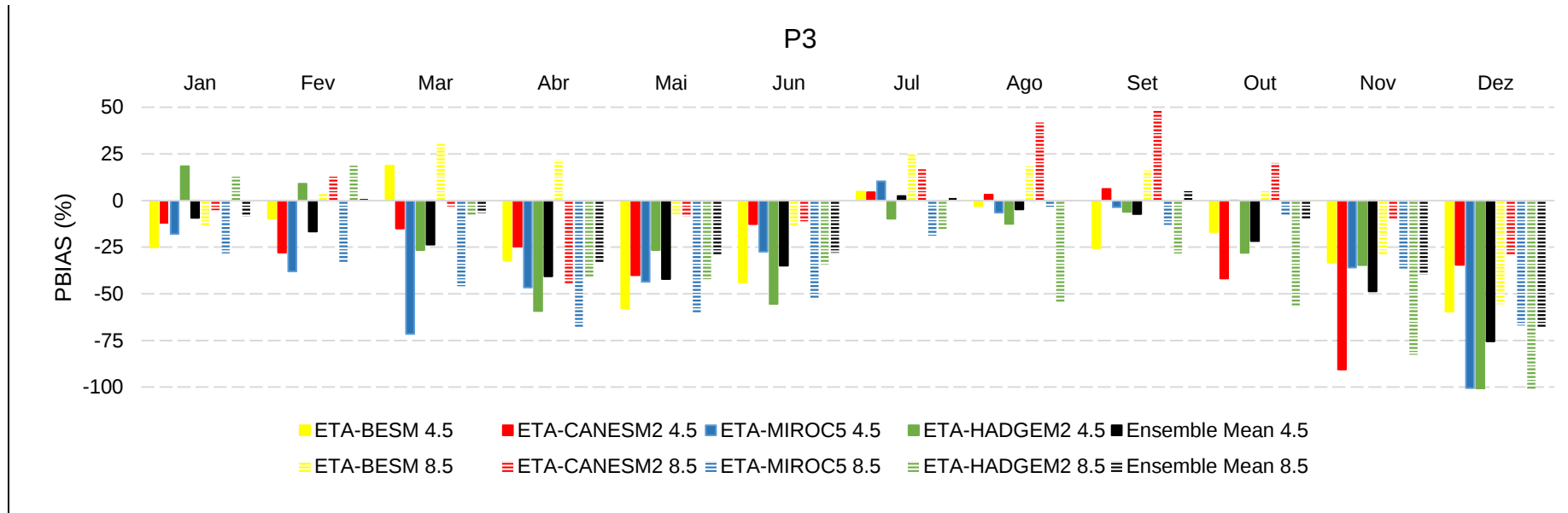


Figura 30 - Variação entre as vazões médias mensais extraídas dos hidrogramas mensais simulados pelo SWAT forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HADGEM2 para os RCPs 4.5 e 8.5, e as vazões extraídas dos hidrogramas mensais simulados pelo SWAT forçado pelo clima passado, para a bacia hidrográfica do rio Piratini (BHRP) considerando os cenários futuros (P1, P2 e P3)

De forma geral, os hidrogramas apresentados na Figura 25, Figura 26, Figura 27 foram bastante similares entre si e, somados aos resultados apresentados nas Figura 28, Figura 29 e Figura 30, pode-se verificar que estes apontam para um aumento nas vazões médias mensais nos cenários futuros P1, P2 e P3. Prognósticos na BHAF indicam, para o *Ensemble Mean* - P1, maior acréscimo para os meses de Dezembro (-50,65%) e Março (-77,36%), considerando o RCP 4.5 e o RCP 8.5, nesta ordem. Para o RCP 8.5, ainda se espera menor acréscimo para o mês de Agosto (-0,57%) e para o RCP 4.5, reduções nas vazões no mês de Agosto (1,57%). Para o *Ensemble Mean* - P2 na BHAF, os prognósticos do RCP 4.5 e 8.5 indicam maior acréscimo nas vazões para o mês de Dezembro (-55,10 e -105,19%) e menores acréscimos para o mês de Agosto (-0,87 e -0,51%). Este mesmo comportamento se observa para o *Ensemble Mean* - P3 na BHAF, com o mês de Dezembro apresentando os maiores acréscimos para o RCP 4.5 (-98,13%) e também para o RCP 8.5 (-102,5%); e o mês de Agosto apresentando os menores acréscimos para o RCP 4.5 (-0,52%). Para o RCP 8.5, prognósticos apontam para reduções nas vazões no mês de Agosto (0,92%).

Prognósticos para a BHAP, considerando o *Ensemble Mean* - P1, indicam maiores acréscimos nas vazões para o RCP 4.5 no mês de Maio (-36,33%) e para o RCP 8.5, maiores acréscimos podem ser esperados para o mês Junho (-24,15%). Menores acréscimos podem ser esperados para o mês de Março para o RCP 8.5 (-0,88%) e sobre reduções nas vazões, os prognósticos indicam o mês de Julho para o RCP 4.5 (2,43%). O *Ensemble Mean* - P2 para a BHAP sugere possíveis aumentos nas vazões para o mês de Maio e Dezembro, para o RCP 4.5 (-36,18%) e RCP 8.5 (-36,17%), nesta ordem. Em consideração às reduções de vazões para a BHAP, estas são esperadas ocorrer no mês de Agosto para o RCP 8.5 (1,2%) e é no mês de Agosto para o RCP 4.5 que poderão ser observados os menores acréscimos de vazões. Já para os prognósticos do *Ensemble Mean* - P3 na BHAP, se esperam maiores reduções tanto para o RCP 4.5 no mês de Julho (4,73%), quanto para o RCP 8.5 para o mês de Fevereiro (12,04%). Os maiores acréscimos para este período poderão ser observados para o mês de Dezembro, considerando os dois RCPs (-51,43% no RCP 4.5 e -37,32% RCP 8.5).

Para a BHRP, os prognósticos indicam, para os três cenários futuros (*Ensemble Mean* - P1, P2 e P3), que os maiores acréscimos ocorrerão no mês de Dezembro para ambos RCPs, exceto para o RCP 8.5 do P2, o qual indica maior acréscimo para o mês de Fevereiro (-35,16%). Os prognósticos ainda indicam, considerando o P1, menores

acrécimos para o mês de Julho (-0,9%) e Agosto (-0,32), RCP 4.5 e RCP 8.5, nesta ordem. Para o P2, os menores acréscimos pelo RCP 4.5 são indicados no mês de Agosto (-2,4%), mês este que indica reduções para o RCP 8.5 (2,8%). Já para o P3 na BHRP, os prognósticos indicam reduções nas vazões para ambos os RCPs, 2,46% para o mês de Julho (RCP 4.5) e para o mês de Setembro (5,74%).

A partir dos resultados apresentados acima considerando as três bacias em estudo, pode-se inferir que, tanto para o RCP 4.5 quanto para o 8.5, há uma maior indicação de acréscimos nas vazões médias mensais para todos os períodos futuros, com maior destaque para o período P2 (2041 a 2070). Com relação aos maiores acréscimos nas vazões médias mensais, os prognósticos destes indicam que, em todos os períodos futuros em comparação ao clima passado, podem ser conferidos ao mês de Dezembro e os menores acréscimos podem ser conferidos ao mês de Agosto, também considerando ambos os RCPs. Além disso, é importante destacar que foi no P3 que se verificou maior frequência na redução de vazões médias mensais. Estes acréscimos podem ser explicados devido ao aumento da precipitação média mensal (Tabela 9) simulada para todos os períodos futuros em todas as bacias analisadas neste estudo.

Independente do período e do RCP avaliado, as maiores variações nas vazões médias, quando comparadas ao clima passado, poderão ocorrer nos meses de janeiro a junho e de outubro a dezembro, enquanto que as menores variações, nos meses de julho, agosto e setembro, meses estes que apresentam os maiores valores de vazão média observados. Caldeira (2019) também encontrou prognóstico de aumento nas vazões médias mensais nos períodos futuros em comparação ao clima passado com maior evidência para o P2 (2041 a 2070). Além disso, de igual forma a este estudo, as maiores variações nas vazões foram indicadas para os meses de janeiro a junho e de outubro a dezembro, e as menores, para os meses de julho, agosto e setembro com o maior número de redução das vazões para o período P3 (2071 a 2099).

As vazões médias anuais obtidas a partir dos hidrogramas mensais simulados pelo modelo hidrológico SWAT forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HADGEM2, para o CP e para P1, P2 e P3, considerando os RCPs 4.5 e 8.5, bem como o *Ensemble Mean*, podem ser visualizadas na Figura 31, Figura 32 e na Figura 33, para a BHAF, BHAP e BHRP, respectivamente.

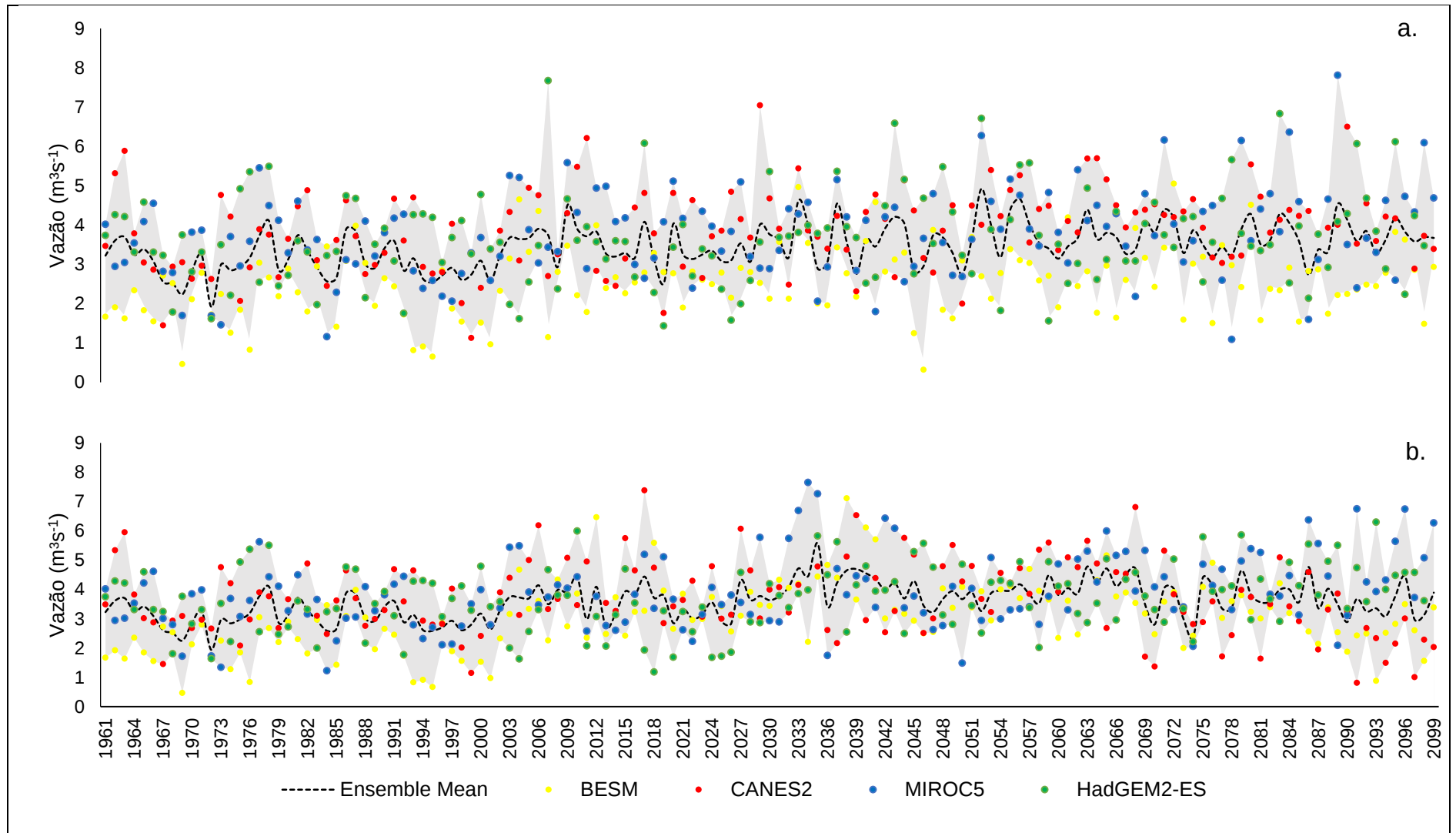


Figura 31 - Vazões médias anuais extraídas dos hidrogramas diários simulados pelo modelo hidrológico SWAT forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HADGEM2 para o clima passado (1961-2005) e projeções futuras de 2006 a 2099, considerando os RCPs 4.5 (a) e 8.5 (b), para a bacia hidrográfica do arroio Fragata (Bhaf).

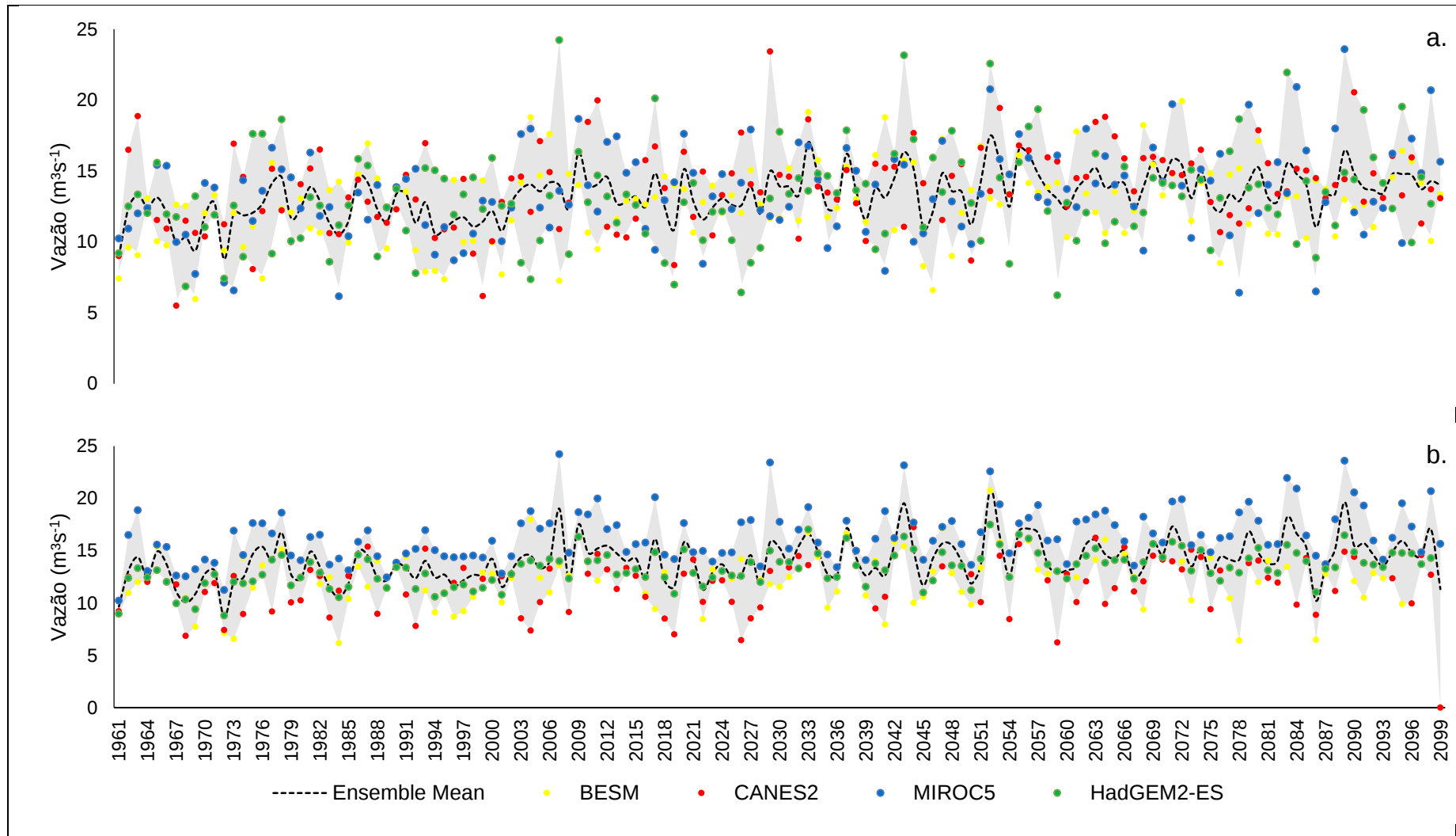


Figura 32 - Vazões médias anuais extraídas dos hidrogramas diários simulados pelo modelo hidrológico SWAT forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HADGEM2 para o clima passado (1961-2005) e projeções futuras de 2006 a 2099, considerando os RCPs 4.5 (a) e 8.5 (b), para a bacia hidrográfica do arroio Pelotas.

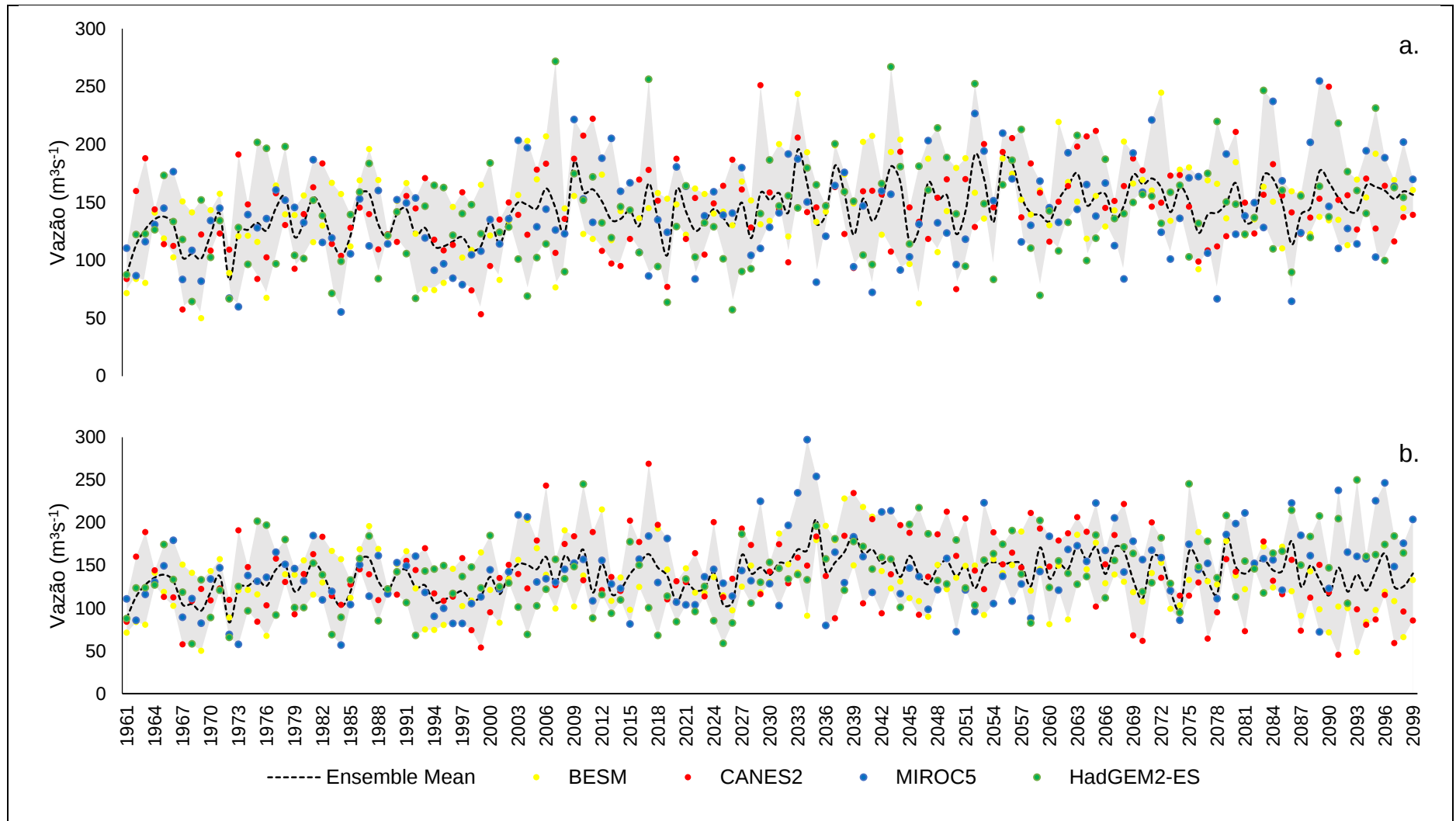


Figura 33 - Vazões médias anuais extraídas dos hidrogramas diários simulados pelo modelo hidrológico SWAT forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HADGEM2 para o clima passado (1961-2005) e projeções futuras de 2006 a 2099, considerando os RCPs 4.5 (a) e 8.5 (b), para a bacia hidrográfica do arroio Piratini.

Considerando as vazões médias anuais extraídas dos hidrogramas mensais simulados pelo modelo hidrológico SWAT forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HADGEM2 para a BHAF, BHAP e BHRP, representadas na Figura 31, Figura 32 e Figura 33, respectivamente, é importante destacar que para a BHAF, considerando o RCP 4.5, que as simulações do SWAT forçado pelo ETA-BESM resultaram em menores valores de vazão média mensal. Outra situação evidente é na BHAP, onde as simulações do SWAT forçado pelo ETA-MIROC5, considerando o RCP 8.5, apresentaram os maiores valores de vazão média mensal, ficando a cargo do ETA-BESM e do ETA-CANES2 as menores vazões. De forma geral, as simulações do modelo SWAT forçado pelo ETA-BESM e ETA-CANES2 resultaram em menores valores de vazão média mensal e os maiores valores foram resultantes do ETA-MIROC5 e do ETA-HADGEM2.

Verifica-se também, nas figuras acima, que o acréscimo na média das vazões médias anuais é maior quando este indicador é obtido a partir dos hidrogramas simulados pelo modelo hidrológico SWAT forçado pelos modelos climáticos frente ao RCP 4.5. Uma vez que a precipitação é a principal forma de entrada de água no ciclo hidrológico em sua fase terrestre (DAVIE, 2008), este fato pode ser justificado em decorrência das projeções dos modelos climáticos para o RCP 4.5, em média, sempre indicarem maiores incrementos da precipitação total anual média nos períodos futuros, quando comparados ao clima passado simulado, como pode ser verificado na (Tabela 9).

Os resultados do teste de Mann-Kendall para a vazão média anual para todo o período e para os três períodos futuros (P1, P2 e P3), em síntese, estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Síntese da análise de tendência com nível de significância de 5%, pelo teste de Mann-Kendall, para o clima passado e as projeções futuras de vazão média anual

Bacias	Modelos climáticos	CP	P1		P2		P3		1961-2099	
			4.5	8.5	4.5	8.5	4.5	8.5	4.5	8.5
BHAF	ETA-BESM	N	N	S+	N	N	N	S-	S+	S+
	ETA-CANESM2	N	N	N	N	N	N	S-	S+	S-
	ETA-MIROC5	N	N	N	N	S+	N	N	S+	S+
	ETA-HADGEM2	N	N	N	N	N	N	N	N	S+
BHAP	ETA-BESM	N	N	S+	S+	N	N	S-	S+	N
	ETA-CANESM2	N	N	N	N	N	N	S-	S+	N
	ETA-MIROC5	N	N	N	N	N	N	N	S+	S+
	ETA-HADGEM2	N	N	N	N	N	N	N	S+	S+
BHRP	ETA-BESM	N	N	S+	N	N	N	S-	S+	N
	ETA-CANESM2	N	N	N	N	N	N	S-	S-	N
	ETA-MIROC5	N	N	N	N	N	N	N	S+	S+
	ETA-HADGEM2	N	N	N	N	N	N	N	S+	S+

N = não houve tendência estatisticamente significativa; S+ = houve tendência estatisticamente significativa de aumento; S- = houve tendência estatisticamente significativa de diminuição

Para todo o período (1961 a 2099), os dados derivados da simulação hidrológica com o modelo SWAT forçado pelos modelos climáticos indicam tendência estatisticamente significativa de aumento nas vazões médias anuais para os dois RCPs, ou seja, na prática, os prognósticos apontam para o aumento, ao longo do tempo, das vazões médias anuais. A exceção se verificou para o ETA-CANESM2 considerando o RCP 8.5 para a BHAF e BHAP e acrescentando o ETA-BESM para a BHRP. Estes indicam diminuição das vazões, porém estas não são estatisticamente significativas ($pvalue > 5\%$). Para P1, P2 e P3, a maioria dos dados das projeções não apresentaram tendência estatisticamente significativa de aumento ou diminuição das vazões médias anuais.

No P1 sob RCP 4.5, as simulações hidrológicas com o modelo SWAT forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM e ETA-HADGEM2 indicaram aumento das vazões e para demais modelos, diminuição, porém não foram estatisticamente significativos. Diferente para o RCP 8.5, onde o ETA-CANESM2 indicou diminuição das vazões e os demais, aumento, com destaque para o ETA-BESM, com indicação de aumento das vazões anuais estatisticamente significativo. No P2 – RCP 4.5 o aumento das vazões é indicado pelos modelos CANES e ETA-MIROC5 e diminuição para os demais. No P2 sob RCP 8.5, a diminuição é indicada pelo modelo ETA-HADGEM2 e o aumento é indicado pelos demais modelos, com

destaque para o ETA-MIROC5 que apresentou resultados significativos com base na estatística.

No P3, os modelos ETA-BESM e ETA-CANESM2 apresentaram resultados que indicam a diminuição das vazões para ambos RCPs, com destaque para os resultados estatisticamente significativos destes modelos para o RCP 8.5. Para os demais modelos, os resultados indicam tendência de aumento das vazões médias anuais. De acordo com Caldeira (2019), as projeções do ETA-BESM e do ETA-CANESM2 para o final do século (2071 – 2099) perante o cenário pessimista (RCP 8.5) indicam tendência de diminuição de precipitação total anual e aumento da temperatura média diária anual para as mesmas bacias utilizadas neste estudo, constatação esta que pode explicar a diminuição das vazões para estes modelos.

As vazões médias de longo termo para o CP, considerando o *Ensemble Mean* da BHAF, BHAP e BHRP, correspondem a, respectivamente, 3,09, 13,66 e 126,30m³.s⁻¹. As variações sempre positivas para o *Ensemble Mean* indicam prognóstico de acréscimo para os períodos futuros (Figura 34).

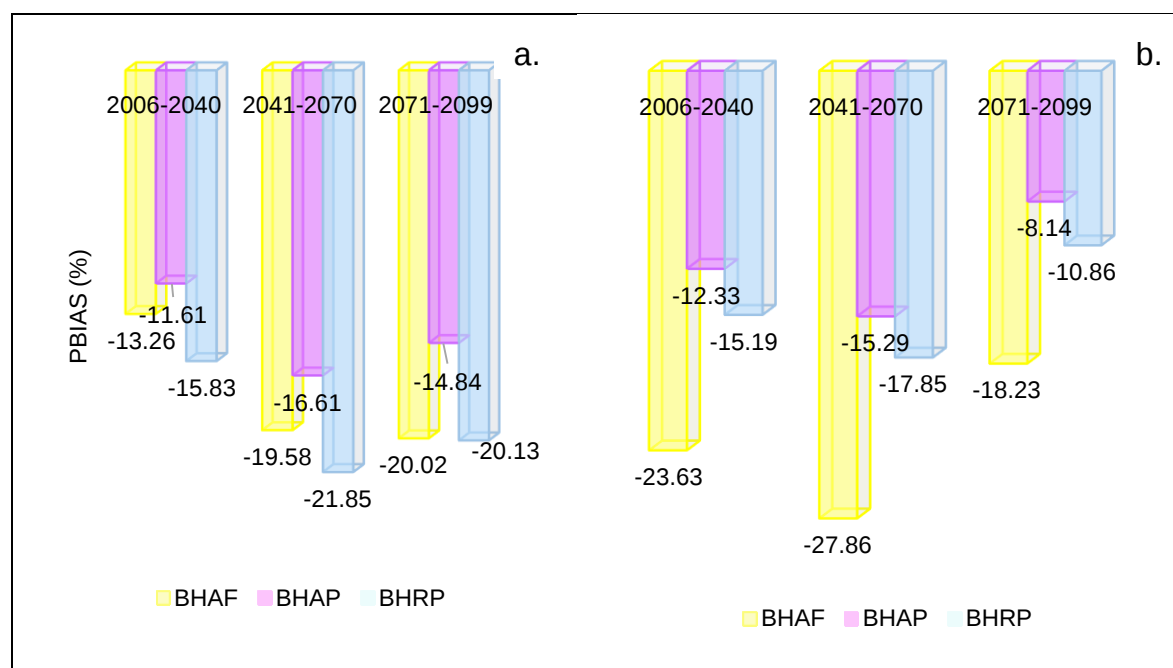


Figura 34 – Variação (PBIAS,%) nos valores de vazão média de longo termo (Q_{mlt}) considerando as projeções do clima futuro em relação ao clima passado, para os RCPs 4.5 (a) e 8.5 (b).

De posse da Figura 34 é possível verificar que o acréscimo na Q_{mlt} é maior, na maioria dos períodos considerados, quando este indicador é obtido a partir dos hidrogramas simulados pelo modelo hidrológico SWAT forçado pelos modelos

climáticos considerando o RCP 4.5. Os maiores acréscimos na Q_{mit} podem ser observados no P2 (2041 a 2070), exceto para o RCP 4.5 da BHAF. Já os menores acréscimos são observados para o P1 (2006-2040) para o RCP 4.5 e no P3 (2071 e 2099) para o RCP 8.5.

Essas relações de aumento/redução da Q_{mit} ao longo do tempo para o RCP 4.5 e 8.5 podem ser explicadas pelo comportamento dos cenários de emissão. No AR5, os cenários são baseados em forçantes radiativas antropogênicas totais no final do século XXI sendo o RCP 8.5 considerado o mais pessimista e que resulta em um aquecimento médio global no final do século XXI de cerca de 4°C. Por outro lado, no RCP 4.5 o forçamento radiativo aumenta quase linearmente até cerca de 2060 e depois diminui a taxa de aumento até o final do século em que se estabiliza (IPCC, 2013). Num cenário pessimista a Q_{mit} aumenta, mas em magnitude menor do que quando as emissões são menos intensas.

Considerando outro indicador importante na análise dos impactos das mudanças climáticas, os valores encontrados de produção de água para as bacias analisadas neste estudo, extraídos dos hidrogramas mensais estimados pelo modelo hidrológico SWAT forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HADGEM2 para o CP e para P1, P2 e P3, podem ser visualizados na Figura 35, Figura 36 e na Figura 37 para a BHAF, BHAP e BHRP, nesta ordem. De forma geral, verifica-se um comportamento semelhante entre as bacias hidrográficas, entre os períodos futuros e entre os RCP's analisados.



Figura 35 - Produção de água ($\text{l.s}^{-1}.\text{km}^{-2}$) determinada a partir do hidrograma simulado pelo modelo hidrológico SWAT forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HADGEM2 para o clima passado (1961-2005) e projeções do clima futuro (2006 a 2099) considerando os RCPs 4.5 (a) e 8.5 (b) para bacia hidrográfica do arroio Fragata.



Figura 36 - Produção de água ($\text{l.s}^{-1}.\text{km}^{-2}$) determinada a partir do hidrograma simulado pelo modelo hidrológico SWAT forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HADGEM2 para o clima passado (1961-2005) e projeções do clima futuro (2006 a 2099) considerando os RCPs 4.5 (a) e 8.5 (b) para a bacia hidrográfica do arroio Pelotas.

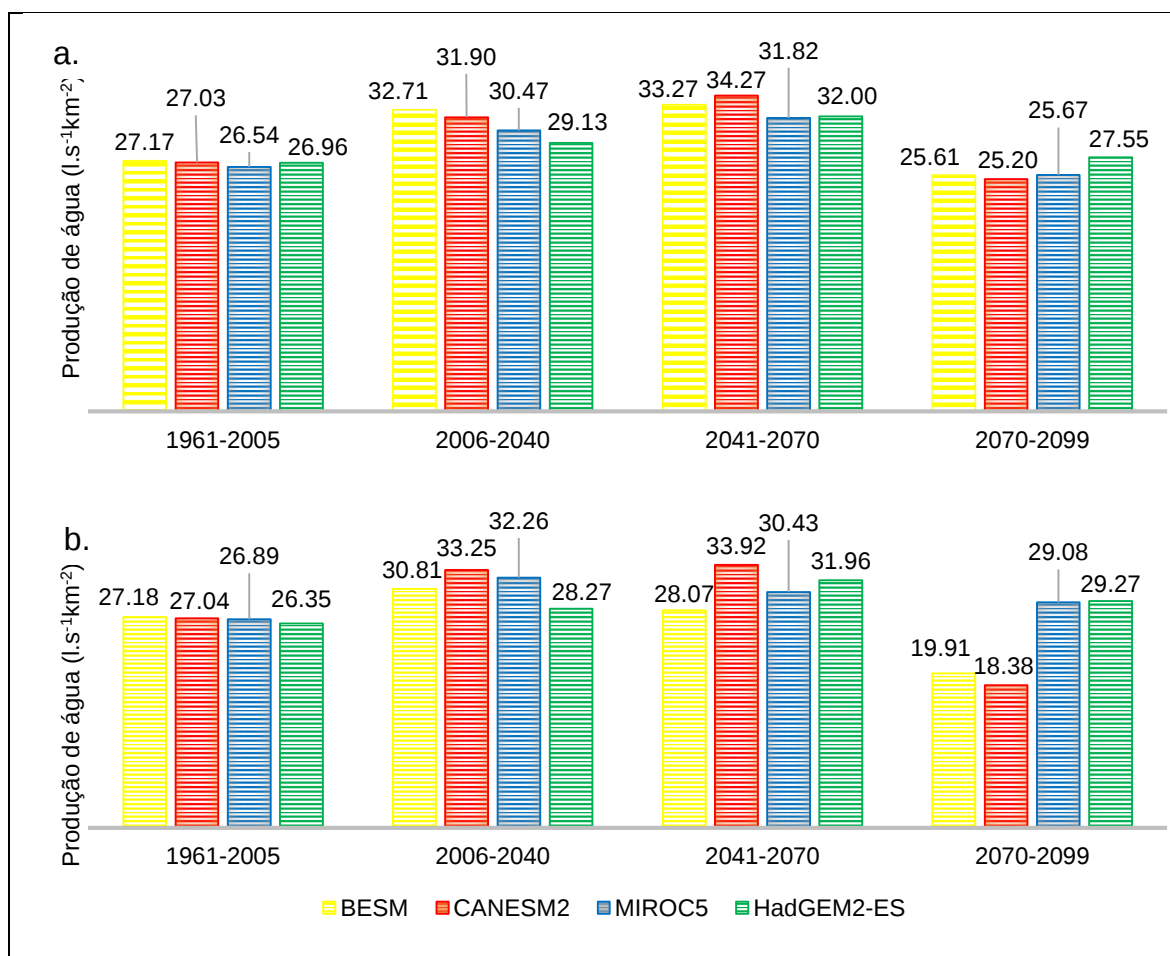


Figura 37 - Produção de água ($\text{l.s}^{-1}.\text{km}^{-2}$) determinada a partir do hidrograma simulado pelo modelo hidrológico SWAT forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HADGEM2 para o clima passado (1961-2005) e projeções do clima futuro (2006 a 2099) considerando os RCPs 4.5 (a) e 8.5 (b) para a bacia hidrográfica do rio Piratini.

Analisando a Figura 35, Figura 36 e Figura 37, os prognósticos indicam que, para a BHAF, o menor aumento na produção de água foi observado pelos hidrogramas mensais forçados pelo modelo ETA-BESM frente ao RCP 4.5 para o P2. Considerando os maiores aumentos, o modelo climático ETA-MIROC5 para o RCP 8.5 foi destaque para o P3, tanto para a BHAF quando para a BHAP. O menor aumento para a BHAP e para a BHRP foi observado no modelo ETA-CANESM2, considerando o P3 e o RCP 8.5. Já o maior acréscimo foi observado no P2, para a BHRP, considerando o RCP 4.5.

Analisando o *Ensemble Mean*, pode-se esperar que na BHAF, a produção de água tenha aumento gradual pelo RCP 4.5, sendo de 27,08, 28,59 e 28,71 $\text{l.s}^{-1}.\text{km}^{-2}$ para, respectivamente, P1, P2 e P3, e que tenha aumento seguido por

redução pelo RCP 8.5, cujos valores indicam 29,52, 30,53 e 28,26l.s⁻¹.km² para os períodos futuros. Na BHAP, os resultados encontrados indicam que a produção de água pode aumentar entre os períodos de P1 e de P2 assim como pode diminuir no período de P3, apresentando valores de 36,55, 38,18 e 37,60l.s⁻¹.km², respectivamente, frente ao RCP 4.5, e de 36,95, 37,92 e 35,57l.s⁻¹.km², respectivamente, pelo RCP 8.5. Para a BHRP, os resultados indicam que a produção de água pode seguir comportamento semelhante à BHAP, sendo de 31,05, 32,84 e 26,01l.s⁻¹.km² pelo RCP 4.5, enquanto que pelo RCP 8.5, de 31,15, 31,19 e 24,16l.s⁻¹.km² para os referidos períodos; para P1, P2 e P3, nesta ordem.

Da mesma forma que na análise das vazões médias mensais, nesta análise, verifica-se que a produção de água determinada a partir de dados obtidos pelo modelo SWAT forçado pelos modelos climáticos para o RCP 8.5 tende a apresentar valores mais baixos que aqueles encontrados no RCP 4.5, e que os maiores incrementos ocorrem no P2. De acordo com Caldeira (2019), inúmeras são as relações sinérgicas que podem causar aumento ou redução da produção de água em uma bacia hidrográfica. Novamente, destaca-se que os prognósticos de menor incremento na produção de água no final do século, quando analisados os modelos ETA-BESM e ETA-CANESM2 perante o RCP 8.5, estão associadas as tendências estatisticamente significativas de redução na precipitação total anual e de aumento na temperatura média diária.

Na bacia de Minas Gerais estudada por Alvarenga et al. (2018), este comportamento não se repetiu, pelo contrário, para o período de baseline do referido estudo (1961-1990), a produção de água foi negativa nos meses de Abril, Maio, Junho e Julho. De acordo com os autores, os dados observados de uma estação meteorológica pertencente à bacia em questão, durante os anos de 2006 a 2010, também apresentaram um déficit hídrico para estes meses, coincidindo com os dados simulados. No cenário da RCP 4.5, os autores encontraram o maior déficit hídrico no início do século XXI (2011-2040), quando o período seco se estendeu de março a agosto. Por outro lado, para o cenário RCP 8.5, os autores encontraram menor disponibilidade de água.

Estes resultados encontrados por Alvarenga et al. (2018) estão relacionados com a constatação mencionada anteriormente, a qual se refere à prognósticos de diminuição de precipitação que ocorre em todo o Brasil, exceto para o Sul. A

avaliação da anomalia média anual do escoamento nas regiões hidrográficas mostra uma redução projetada da disponibilidade de água em quase todo o país com exceção da região sul do Brasil (Neto et al., 2016).

Neste sentido e considerando o prognóstico de aumento da precipitação e, conseqüentemente, das vazões médias mensais, Caldeira (2019) enfatiza que este prognóstico, especialmente durante o verão, é animador quando considerado o fato de que as bacias são predominantemente agrícolas e que a região faz uso, neste período, de fornecimento suplementar de água às culturas mediante técnicas de irrigação. A autora ainda menciona que, durante o inverno, são observadas nas séries históricas as maiores magnitudes de vazão média mensal, o que dá indícios de um impacto relativamente baixo aos usuários de água das bacias no que tange aos prognósticos de redução para o período futuro.

Esta constatação se torna ainda mais importante visto que, de acordo com Asfaw (2018), os impactos adversos de mudança climática serão sentidos com maior força pelos pequenos agricultores de países em desenvolvimento, os quais dependem, em grande parte, dos recursos naturais necessários para os sistemas de cultivo e criação de gado. Riddle e Cook (2008) apontaram que os calendários agrícolas, em muitas partes da África, estão intimamente ligados ao momento das chuvas locais, como às melhores previsões de início e término da estação chuvosa, da mesma forma como acontece no Brasil.

4.5.2. Vazões máximas

As vazões máximas anuais observadas nos hidrogramas mensais determinadas pelo modelo hidrológico SWAT forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HADGEM2, para o CP e para os P1, P2 e P3, considerando os RCPs 4.5 e 8.5, bem como o *Ensemble Mean*, podem ser visualizadas na Figura 38 para a BHAF, na Figura 39 para a BHAP e Figura 40 para a BHRP.

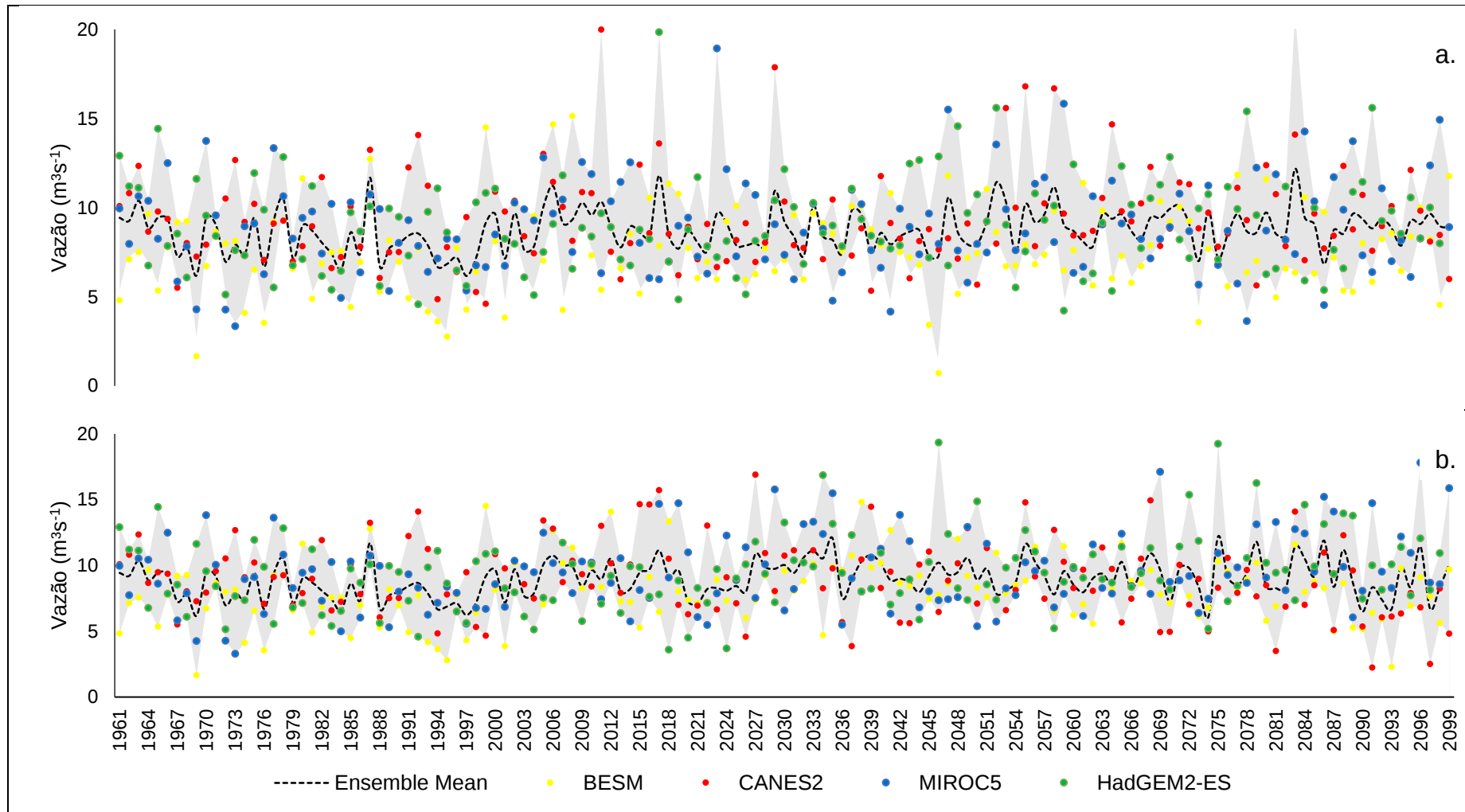


Figura 38 – Máximas vazões médias mensais extraídas dos hidrogramas mensais simulados pelo modelo hidrológico SWAT forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HADGEM2 para o clima passado (1961 a 2005) e projeções futuras (2006 a 2099), considerando os RCPs 4.5 (a) e 8.5 (b), para a bacia hidrográfica do arroio Fragata.

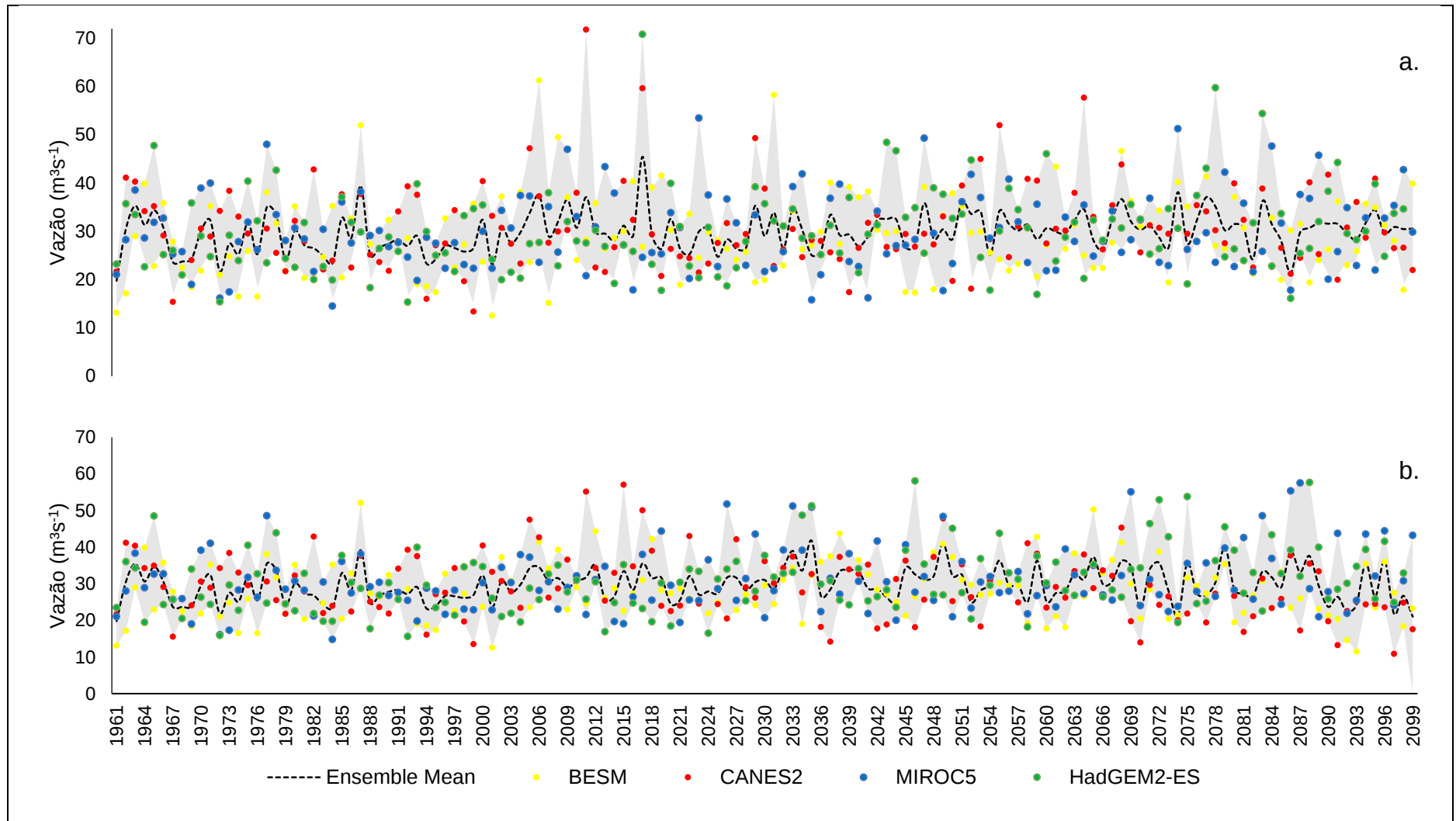


Figura 39 - Máximas vazões médias mensais extraídas dos hidrogramas mensais simulados pelo modelo hidrológico SWAT forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HADGEM2 para o clima passado (1961 a 2005) e projeções futuras (2006 a 2099), considerando os RCPs 4.5 (a) e 8.5 (b), para a bacia hidrográfica do arroio Pelotas.

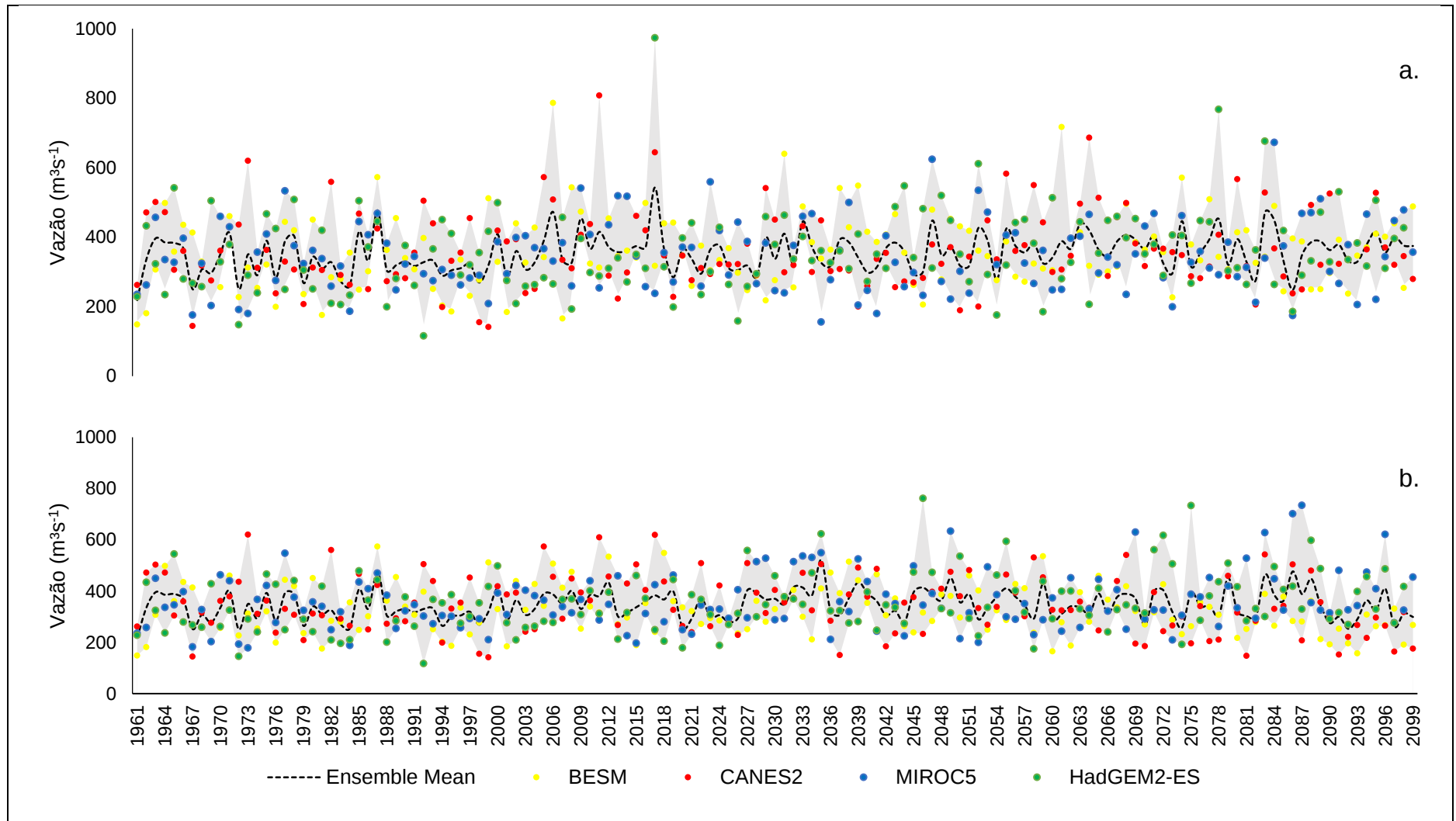


Figura 40 - Máximas vazões médias mensais extraídas dos hidrogramas mensais simulados pelo modelo hidrológico SWAT forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HADGEM2 para o clima passado (1961 a 2005) e projeções futuras (2006 a 2099), considerando os RCPs 4.5 (a) e 8.5 (b), para a bacia hidrográfica do rio Piratini.

Ao analisar a Figura 38, Figura 39 e Figura 40, pode-se constatar que o mesmo comportamento averiguado para as vazões médias anuais, ocorreu para as máximas vazões médias mensais, ou seja, de forma geral, os menores valores de vazões máximas anuais foram encontrados para as simulações do modelo SWAT forçado pelos modelos ETA-BESM e ETA-CANES2, enquanto que os maiores valores pelos modelos ETA-MIROC5 e ETA-HADGEM2.

A Q_{me} , observada no CP, a partir do *Ensemble Mean* das máximas vazões médias mensais anuais, obtidas dos hidrogramas mensais simulados pelo modelo hidrológico SWAT forçado pelos diferentes modelos climáticos, foi de $8,26\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ para a BHAF, $28,16\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ para a BHAP e de $330,99\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ para a BHRP. Considerando o *Ensemble Mean* derivado das projeções climáticas futuras, os prognósticos estão apresentados na Figura 41.

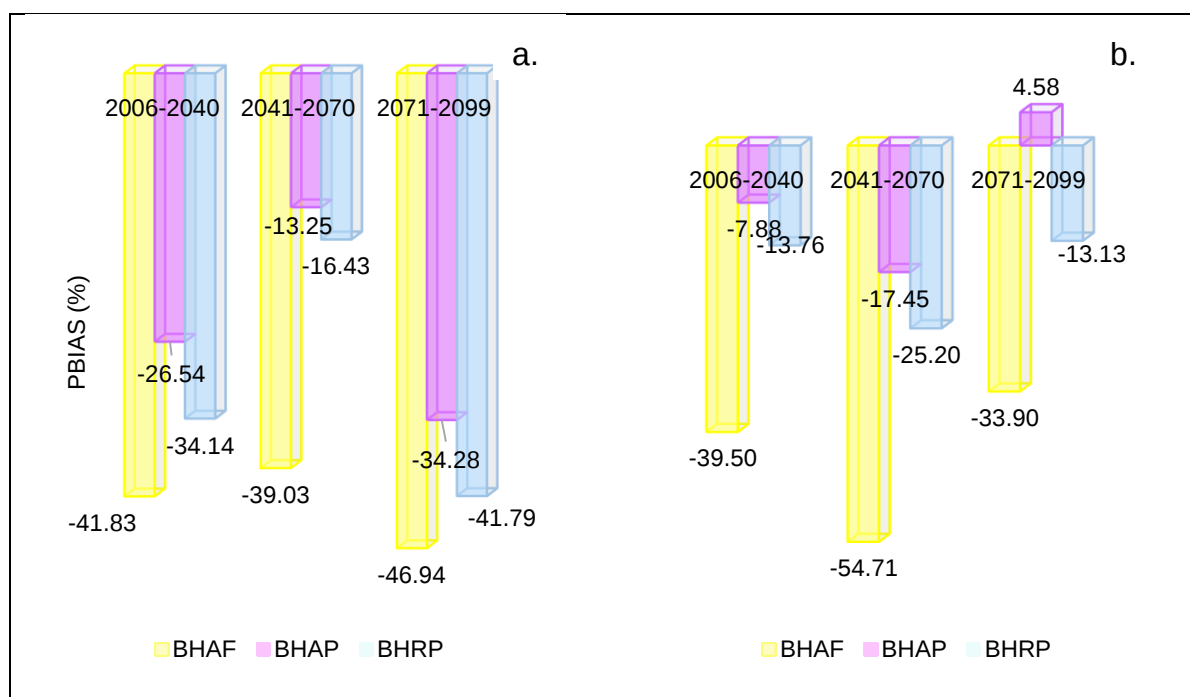


Figura 41 – Variação (PBIAS,%) nos valores de vazão média de enchente (Q_{me}) quando comparados os dados obtidos por Ensemble Mean para o clima passado e para as projeções do clima futuro considerando os RCPs 4.5 (a) e 8.5 (b) na bacia hidrográfica do arroio Fragata, bacia hidrográfica do arroio Pelotas e na bacia hidrográfica do rio Piratini.

Os resultados apontados na Figura 41 indicam acréscimo nos valores de Q_{me} nas três bacias hidrográficas analisadas com destaque para o P3 no RCP 4.5, onde, para todas as bacias, é o período de maior acréscimo. Porém, é importante destacar que como foi considerado a média, este procedimento suaviza as vazões

máximas, sendo esperado vazões menores se considerado as vazões máximas anuais. No caso do RCP 8.5, os maiores acréscimos são observados para o P2. Considerando os menores acréscimos, estes são observados no P2, para o RCP 4.5, e no P3, para o RCP 8.5.

O prognóstico de aumento da Q_{me} nas bacias que remete, consequentemente, ao aumento do risco potencial de cheia nos rios é considerado, de acordo com Arnell e Gosling (2016), um dos impactos mais frequentemente citados nos estudos sobre o clima futuro e as bacias hidrográficas. De acordo com Caldeira (2019), se por um lado é animador o fato de que os prognósticos indicam aumento da disponibilidade hídrica nas bacias, por outro, é preocupante o fato de que as vazões médias de enchente tendem a aumentar, e por consequência, elevar a cota média de enchente. Estudos paleo-hidrológicos sugerem que pequenas mudanças no clima podem produzir grandes mudanças em extremos, e, por mais que o escoamento durante a vida útil de várias etapas dos principais projetos de infraestrutura hídrica iniciadas agora são grandes o suficiente para suportar as mudanças, algumas regiões têm pouca infraestrutura para amortecer os impactos das mudanças (MILLY et al. 2008).

Estes fatos se tornam agravantes quando considerado que já existem históricos de danos causados por enchentes e inundações, como se verifica na área urbana de Pedro Osório e Cerrito (TELLES, 2002), próximo à seção de controle da BHRP. A partir disso, a implementação de Planos de Bacia, Planos Diretores e Zoneamento Urbano baseados em estudos como este são de extrema importância para o gerenciamento das bacias hidrográficas, além dessas presentes neste estudo, como de outras pertencentes à região.

Outro problema associado ao aumento das vazões máximas, conforme Caldeira (2019), tange à conservação do solo e da água, uma vez que estas vazões têm grande parcela de escoamento superficial direto, responsável pelo processo de erosão hídrica e transporte de sedimentos nas bacias. De acordo com a autora, maiores índices de escoamento superficial direto tendem a elevar a perda de solo agricultável nas bacias e a comprometer a qualidade das águas dos mananciais, cabendo neste aspecto uma análise mais detalhada a respeito das parcelas do escoamento verificadas nos hidrogramas diários estimados por modelagem

hidrológica forçada pelos modelos climáticos, para verificar se, de fato, isso ocorre, e do comportamento da erosividade da chuva frente às mudanças climáticas.

4.5.3. Vazões mínimas

As mínimas vazões médias anuais obtidas nos hidrogramas mensais simuladas pelo modelo hidrológico SWAT forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HADGEM2, para o CP e para os P1, P2 e P3, considerando os RCPs 4.5 e 8.5, bem como o *Ensemble Mean*, podem ser visualizadas na Figura 42 para a BHAF, Figura 43 para a BHAP e na Figura 44 para a BHRP.

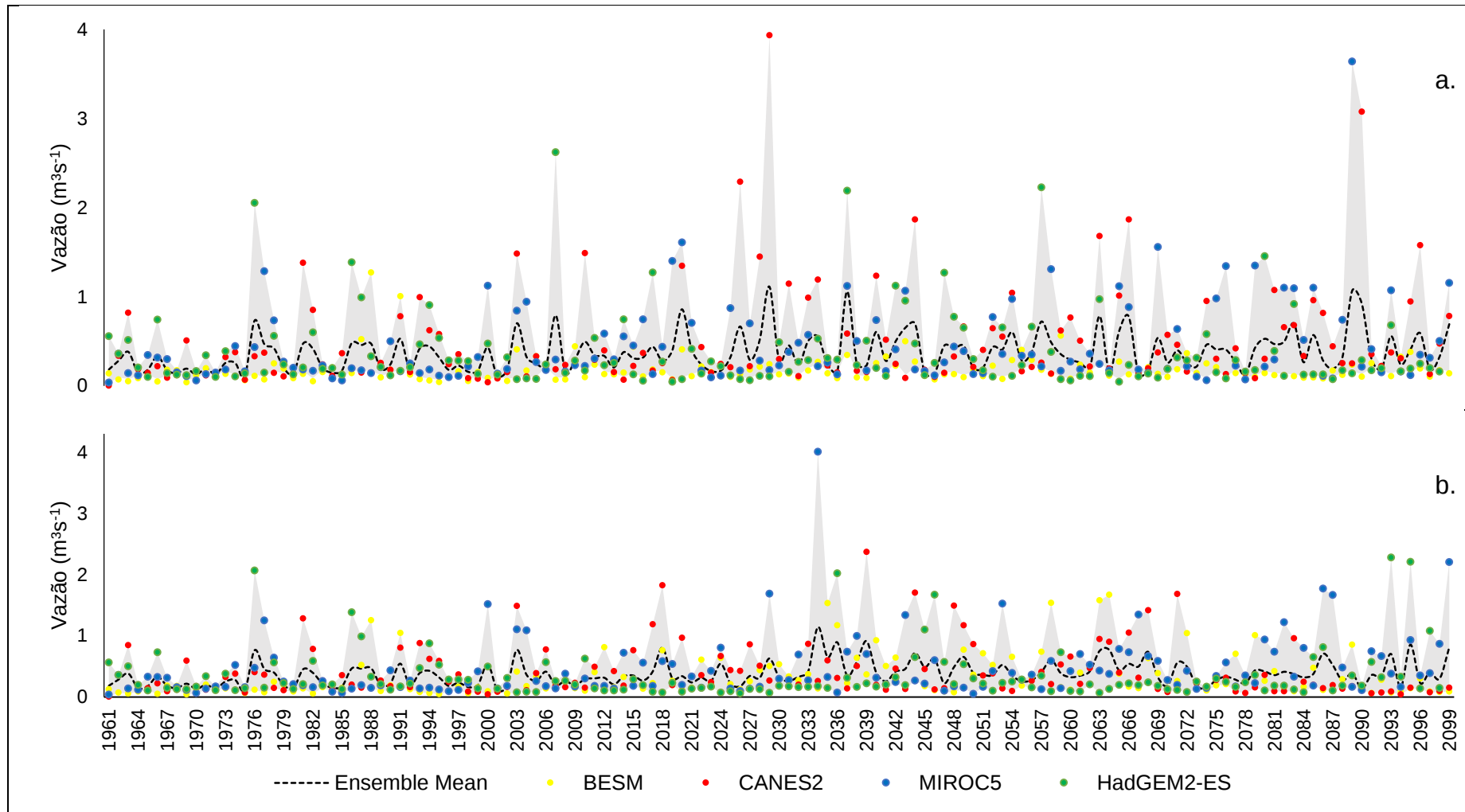


Figura 42 – Mínimas vazões médias anuais extraídas dos hidrogramas mensais simulados pelo modelo hidrológico SWAT forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HADGEM2 para o clima passado (1961 a 2005) e projeções futuras (2006 a 2099), considerando os RCPs 4.5 (a) e 8.5 (b), para a bacia hidrográfica do arroio Fragata.

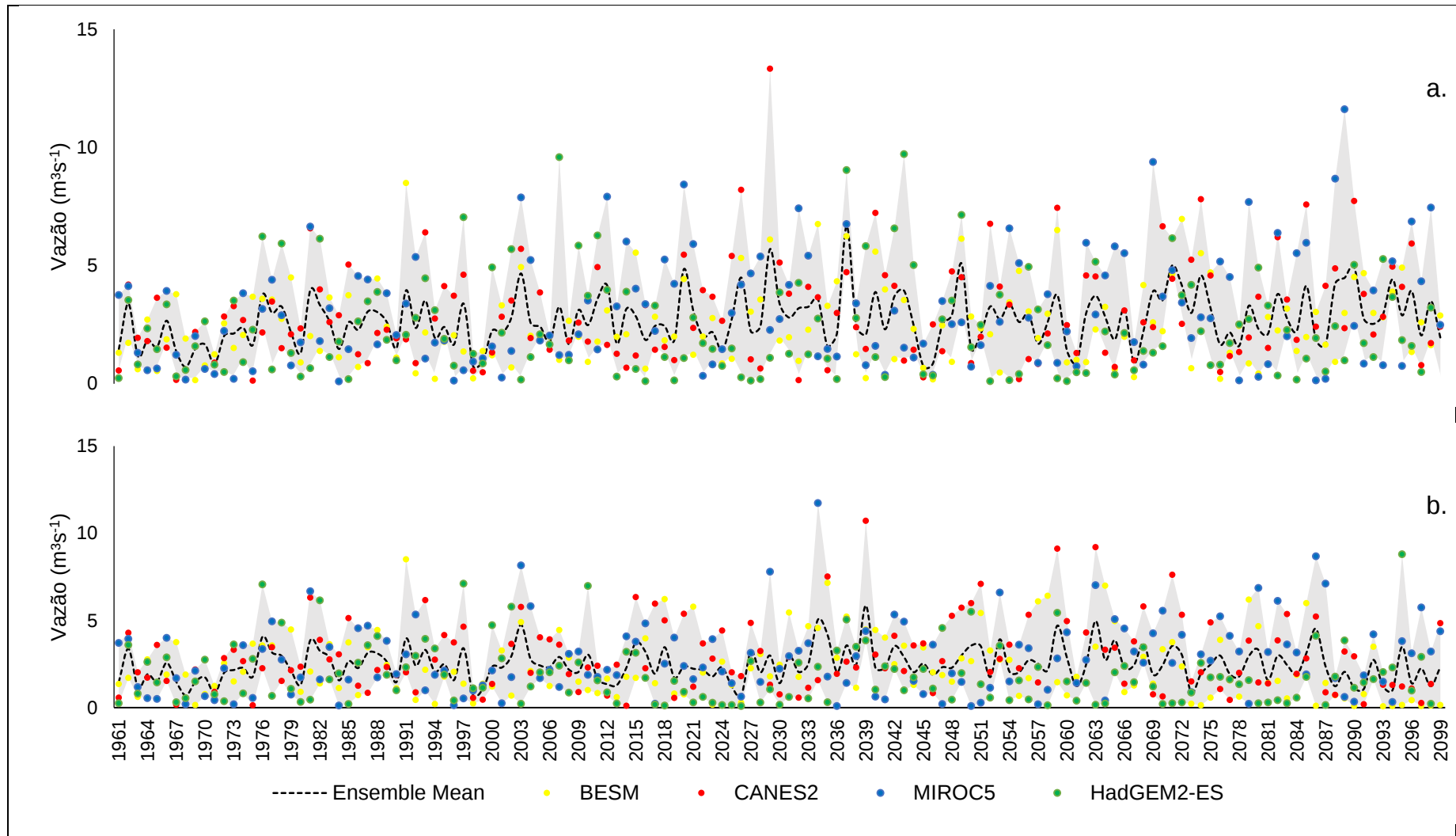


Figura 43 – Mínimas vazões médias anuais extraídas dos hidrogramas mensais simulados pelo modelo hidrológico SWAT forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HADGEM2 para o clima passado (1961 a 2005) e projeções futuras (2006 a 2099), considerando os RCPs 4.5 (a) e 8.5 (b), para a bacia hidrográfica do arroio Pelotas.

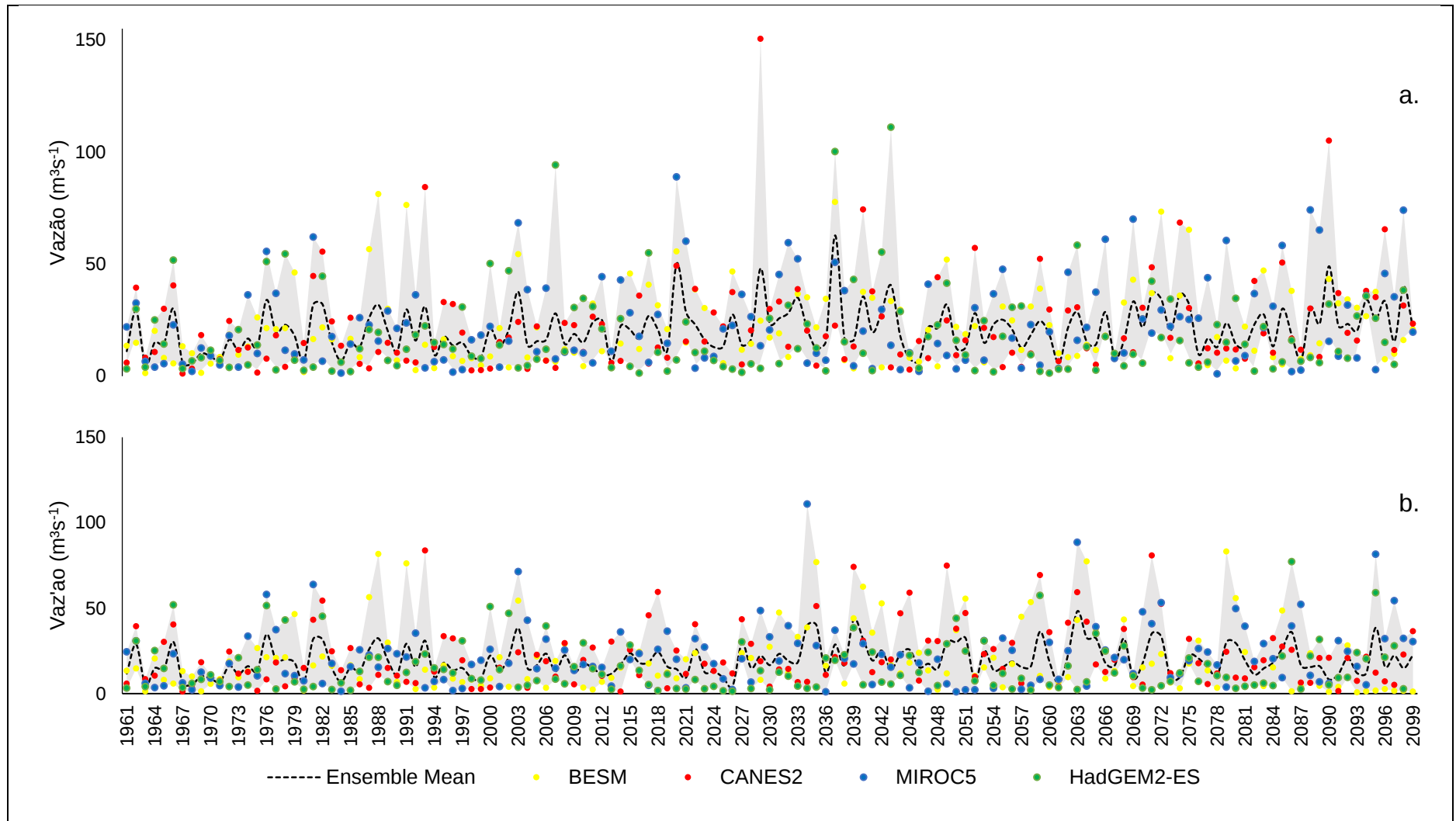


Figura 44 – Mínimas vazões médias anuais extraídas dos hidrogramas mensais simulados pelo modelo hidrológico SWAT forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HADGEM2 para o clima passado (1961 a 2005) e projeções futuras (2006 a 2099), considerando os RCPs 4.5 (a) e 8.5 (b), para a bacia hidrográfica do rio Piratini.

Os resultados encontrados a partir da análise da Figura 42, Figura 43 e Figura 44, apontam para um comportamento ligeiramente diferente daqueles encontrados para as vazões médias e máximas anuais. Para as mínimas vazões médias anuais, além do ETA-BESM e ETA-CANES2, as simulações do modelo SWAT forçado pelo ETA-HADGEM2 também resultaram em menores valores de vazões mínimas, principalmente para o P2. Este comportamento do ETA-HADGEM2 também foi verificado no estudo de Santos et al. (2019), onde as vazões mínimas simuladas pelo modelo SWAT foram menores quando estimadas por este modelo climático.

Analisando o CP e o *Ensemble Mean* de cada bacia, pode-se verificar que as médias das mínimas vazões médias anuais foram de $0,29\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ para a BHAF, $2,32\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ para a BHAP e $17,22\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ para a BHRP. Como foi considerado a média, é importante destacar que este procedimento suaviza as vazões mínimas, sendo esperado vazões menores se considerado as vazões mínimas anuais. As variações das médias das vazões mínimas anuais para os períodos futuros, em comparação com os valores para o período presente, podem ser visualizadas na Figura 45.

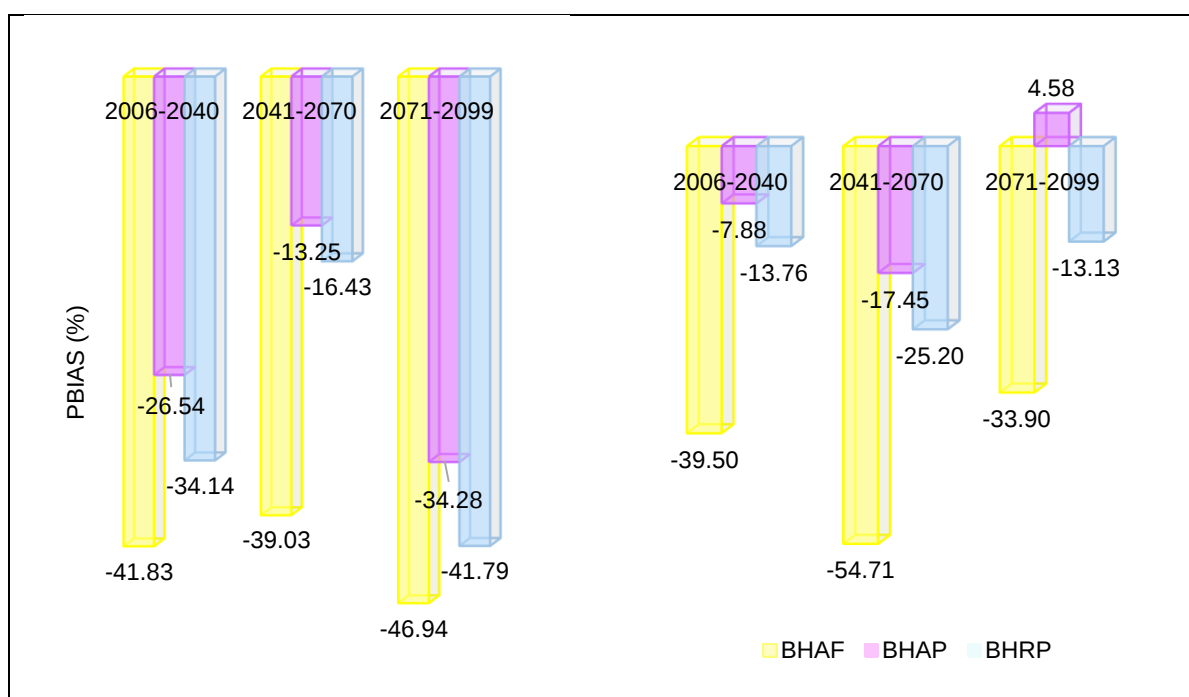


Figura 45 – Variação (PBIAS,%) nas médias das mínimas vazões médias anuais quando comparados os dados obtidos por Ensemble Mean para o clima passado e para as projeções do clima futuro perante os RCPs 4.5 (a) e 8.5 (b) na bacia hidrográfica do arroio Fragata, na bacia hidrográfica do arroio Pelotas e na bacia hidrográfica do rio Piatini.

Os resultados apontados pela Figura 45, assim como foi observado nas vazões médias de enchente, também indicam acréscimo nas médias das mínimas vazões médias anuais nas três bacias hidrográficas analisadas com destaque para o P3 no RCP 4.5, onde, para a maioria das bacias, é o período de maior acréscimo e no RCP 8.5, período de maior diminuição das vazões. A exceção é observada no P3 para a BHAP, onde a Figura 45 indica que pode ocorrer uma redução de 4,58% na média das vazões mínimas, frente ao RCP 8.5. Além disso, diferentemente das vazões médias de enchente, a BHAF foi a bacia que apresentou os maiores acréscimos e diminuições, seguido da BHRP e da BHAP.

Shrestha et al. (2019) avaliaram o impacto das mudanças no clima futuro sobre as vazões mínimas em uma bacia hidrográfica americana, empregando o modelo hidrológico SWAT e um conjunto de 10 projeções climáticas considerando os RCP's 4.5 e 8.5. Segundo os autores, os resultados apontam para aumento nas vazões mínimas, potencialmente atribuído ao incremento na intensidade e distribuição da precipitação projetada pelos modelos climáticos. Para Caldeira (2019) e para o presente estudo, a influência da precipitação também é verificada, visto que, pelo RCP 8.5 para o P3, as projeções de dois dos quatro modelos climáticos avaliados indicam incremento em menor magnitude da precipitação total anual e têm tendência estatisticamente significativa de redução da variável ao longo do tempo segundo dois dos quatro modelos climáticos avaliados. Este comportamento pode ter causado uma redução e pequenos acréscimos nas vazões mínimas anuais no período.

5 Considerações Finais

Os resultados obtidos a partir da modelagem hidrológica confirmam a hipótese definida no início da pesquisa. A calibração do modelo SWAT apresentou resultados que, de modo geral, podem ser considerados satisfatórios para as bacias analisadas frente à disponibilidade de dados na região. Quanto às mudanças climáticas, os resultados indicam aumento nas vazões médias, máximas e mínimas anuais, e que as maiores variações são obtidas frente às projeções climáticas fundamentadas no RCP 4.5. Para o RCP 8.5, a maioria dos indicadores avaliados com base na modelagem hidrológica forçada por projeções climáticas apresentaram acréscimos em menor magnitude ao final do século XXI.

Embora exista divergência entre os modelos climáticos utilizados neste estudo, uma tendência crescente na precipitação e aumento na temperatura pode ser vista nos modelos. Os resultados apresentados neste estudo mostram os efeitos das mudanças climáticas na disponibilidade de água, onde um aumento na precipitação nos períodos futuros é esperado, levando ao aumento nas vazões médias, mínimas e máximas anuais, bem como maior frequência de eventos extremos. Tais tendências podem ser preocupantes quando levado em consideração problemas relacionados ao excesso de água, como enchentes e inundações, principalmente para regiões que já possuem histórico de eventos extremos de precipitação, erosão hídrica e conservação do solo e da água. Por outro lado, este resultado pode ser positivo para a agricultura, a qual depende fortemente da disponibilidade futura de água.

Os resultados e constatações apresentados aqui podem ajudar os tomadores de decisão a planejar melhor o gerenciamento da água em relação às mudanças climáticas previstas e a consequente ocorrência de desastres naturais com maior frequência. Este estudo pode fornecer informações úteis para futuros planejamentos e gestão de recursos naturais e apoiar na implementação estratégias para mitigar os efeitos das mudanças climáticas na região, como obras hidráulicas, projetos de irrigação, conservação do solo, prevenção de doenças de veiculação hídrica, entre outros. Como as bacias hidrográficas estudadas apresentam similaridades em condições climáticas, uso e tipo do solo e está inteiramente dentro do bioma Pampa, os resultados deste estudo ainda podem ser utilizados para predizer o comportamento hidrológico de bacias hidrográficas com escassez de dados.

6 Limitações do estudo

Os resultados obtidos neste estudo indicam algumas limitações importantes de serem destacadas, como:

A utilização de apenas uma imagem de satélite correspondente ao ano de 1999 para interpretação e elaboração do mapa de uso e cobertura do solo não contempla a mudança do uso e cobertura do solo ao longo do tempo;

O emprego de uma única função objetivo para a calibração do modelo hidrológico SWAT pode não retratar de forma adequada o ajuste desejado, levando a resultados tendenciosos, sendo indicado a utilização de função multi-objetivo;

Presença de erros associados à estimativa de picos atribuída à forma com que a distribuição das chuvas é conduzida no SWAT, indicando a necessidade de considerar um maior número de estações de monitoramento dentro da área das bacias;

A comparação entre indicadores obtidos por modelagem hidrológica forçada pelo clima passado dos modelos climáticos e indicadores obtidos da série histórica de vazões pode ser realizada somente para a BHAF e BHAP, tendo em vista a inexistência de dados observados no período para a BHRP;

A utilização de dados do clima passado e de projeções climáticas de quatro MCGs acoplados a um MCR e a um modelo hidrológico, sugerindo a utilização de análise hidrológica multi-modelo;

Os dados de modelagem climática utilizados neste estudo (precipitação e dados de superfície) são os mais difíceis de se prever em qualquer modelo meteorológico;

As análises dos indicadores hidrológicos realizada somente com foco no escoamento total no exutório de cada bacia, sem levar em consideração outros processos do ciclo hidrológico, ou, até mesmo, a análise por sub-bacia.

REFERÊNCIAS

ABBASPOUR, K.; JOHNSON, C. A.; VAN GENUCHTEN, M. Th. Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure. **Vadose Zone Journal**, v. 3, n. 4, p. 1340-1352, 2004.

ABBASPOUR, K. SWAT-CUP 2012. SWAT Calibration and Uncertainty Program—A User Manual, 2013.

ABBASPOUR, K.; ROUHOLAHNEJAD, E.; VAGHEFI, S.; SRINIVASAN, R.; YANG, H.; KLOVE, B. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. **Journal of Hydrology**, v. 524, p. 733-752, 2015.

AHMAD, M.; GHUMMAN, A.; AHMAD, S.; HASGMI, H. Estimation of a Unique Pair of Nash Model Parameters: An Optimization Approach. **Water Resources Management**, v. 24, p. 2971-2989, 2010.

ALLEN, R.; PEREIRA, L.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56**. Rome: FAO, 1998. 300 p.

ALVARENGA, L.; MELLO, C.; COLOMBO, A.; CHOU, S.; CUARTAS, L.; VIOLA, M. Impacts of Climate Change on the Hydrology of a Small Brazilian Headwater Catchment Using the Distributed Hydrology-Soil-Vegetation Model. **American Journal of Climate Change**, v. 7, n. 02, p. 355, 2018.

ANA. Hidroweb: sistemas de informações hidrológicas. Disponível em: <<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/>>. Acesso em: Abril de 2017.

ANDRADE, M. A.; MELLO, C.R.; BESKOW, S. Simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica representativa dos Latossolos na região Alto Rio Grande, MG.

Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental (Online), v. 17, p. 69-76, 2013.

ARNELL, N.; LLOYD-HUGHES, B. The global-scale impacts of climate change on water resources and flooding under new climate and socio-economic scenarios. **Climatic Change**, v. 122, n. 1-2, p. 127-140, 2014.

ARNELL, N. W.; GOSLING, S. N. The impacts of climate change on river flood. **Climatic Change**, v. 134, p. 387–401, 2016.

ARNOLD, J.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R.; WILLIAMS, J. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 34, n. 1, p. 73-89, 1998.

ARNOLD, J. G. et al. SWAT: Model use, calibration, and validation. **Transactions of the ASABE**, v. 55, n. 4, p. 1491-1508, 2012.

ARORA, V.; SCINOCCA, J.; BOER, G.; CHRISTIAN, J.; DENMAN, K.; FLATO, G.; KHARIN, V.; LEE, W.; MERRYFIELD, W. Carbon emission limits required to satisfy future representative concentration pathways of greenhouse gases. **Geophysical Research Letters**, v. 38, p. 1-6, 2011.

AUGER, J.; BIRKEL, S.; MAASCH, J.; MAYEWSKI, P.; SCHUENEMANN, K. An ensemble mean and evaluation of third generation global climate reanalysis models. **Atmosphere**, v. 9, n. 6, p. 236, 2018.

ASFAW, A.; SIMANE, B.; HASSEN, A.; BANTIDER, A. Variability and time series trend analysis of rainfall and temperature in northcentral Ethiopia: A case study in Woleka sub-basin. **Weather and Climate Extremes**, v. 19, p. 29-41, 2018.

AZAMBUJA, J. **Hidrovia da Lagoa Mirim: Um marco de desenvolvimento nos caminhos do Mercosul**. Dissertação (Mestrado Profissionalizante em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande. Rio Grande, 182p. 2005.

BAJRACHARYA, A.; BAJRACHARYA, S.; SHRESTHA, A.; MAHARJAN, S. Climate change impact assessment on the hydrological regime of the Kaligandaki Basin, Nepal. **Science of The Total Environment**, v. 625, p. 837-848, 2018.

BATES, B.; KUNDZEWICZ, Z.; WU, S. **Climate Change and Water**. Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat: Geneva, 2008. 210p.

BESKOW, S.; MELLO, C.; COELHO, G.; SILVA, A.; VIOLA, M. Estimativa do escoamento superficial em uma bacia hidrográfica com base em modelagem dinâmica e distribuída. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 1, p. 169-178, 2009.

BESKOW, S.; MELLO, C. R. D.; NORTON, L. D. Development, sensitivity and uncertainty analysis of LASH model. **Scientia Agricola**, v. 68, p. 265-274, 2011.

BESKOW, S.; SOUZA, M. R.; LUZ, E. P. D. Ciclo hidrológico. In: RODRIGUES, C. **Programa Gestor de Recursos Hídricos**. Santa Cruz do Sul: Essere Nel Mondo, 2015. Cap. 1, p. 6-12.

BESKOW, S.; TIMM, L.; TAVARES, V.; CALDEIRA, T.; AQUINO, L. Potential of the LASH model for water resources management in data-scarce basins: a case study of the Fragata River basin, southern Brazil. **Hydrological Sciences Journal**, v. 61, 2016.

BEVEN, K. J. **Rainfall-runoff modelling: the primer**. 1^a. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2004.

BEZERRA, J. F. **Solo: substrato da vida**. EMBRAPA Recursos Genéticos e Biotecnologia, Brasília, 2006.

BIANCHI, R. **Análise hidrológica temporal do escoamento superficial da Bacia Hidrográfica do Rio Canguiri, Região Metropolitana de Curitiba, PR.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal). Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 121p. 2013.

BIEMANS, H. **Water constraints on future food production.** PhD thesis, Wageningen University. 2012.

BLACK, T. L. The new NMC mesoscale Eta model: Description and forecast examples. **Weather and forecasting**, v. 9, n. 2, p. 265-278, 1994.

BRESSIANI, D.; GASSMAN, P.; FERNANDES, J.; GARBOSSA, L.; SRINIVASAN, R.; BONUMÁ, N.; MENDIONDO, E. Review of soil and water assessment tool (SWAT) applications in Brazil: challenges and prospects. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 8, n. 3, p. 9-35, 2015.

CALDEIRA, T. L. Modelagem do impacto das mudanças climáticas sobre a hidrologia de sub-bacias da bacia hidrográfica transfronteiriça Mirim-São Gonçalo. 2019. 240f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2019.

CARVALHO, P.C.F.; MARASCHIN, G.E.; NABINGER, C. Potencial produtivo do campo nativo do Rio Grande do Sul. In: PATIÑO, H.O. (Ed.). Suplementação de ruminantes em pastejo, 1, Anais, Porto Alegre. 1998.

CARVALHO, D.; SILVA, L. **Apostila de hidrologia.** Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2006. 115p.

CASSALHO, F.; BESKOW, S.; MELLO, C. R.; OLIVEIRA, L.; AGUIAR, M. Evaluation of flood timing and regularity over hydrological regionalization in Southern Brazil. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 24, n. 8, p. 05019022, 2019.

CEPED. **Atlas brasileiro de desastres naturais 1991 a 2012: volume Rio Grande do Sul**. CEPED-UFSC, 2013. 185p

CHEN, X.; CHEN, Y. D.; XU, C. Y. A distributed monthly hydrological model for integrating spatial variations of basin topography and rainfall. **Hydrological Processes**, v. 21, n. 2, p. 242-252, 2007.

CHEN, J.; BRISSETE, F.; CHAUMONT, D.; BRAUN, M. Finding appropriate bias correction methods in downscaling precipitation for hydrologic impact studies over North America. **Water Resources Research**, v. 49, n. 7, p. 4187-4205, 2013.

CHOU, S. et al. Downscaling of South America present climate driven by 4-member HadCM3 runs. **Climate Dynamics**, v. 38, p. 635-653, 2012.

CHOU, S. et al. Assessment of climate change over South America under RCP 4.5 and 8.5 downscaling scenarios. **American Journal of Climate Change**, v. 3, n. 5, p. 512-525, 2014.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Applied Hydrology**. 1. ed. New York: McGraw-Hill, 1988. 588 p.

COLLINS, W. J. et al. Development and evaluation of an Earth-System model - ETA-HADGEM2. **Geoscientific Model Development**, v. 4, p. 1051-1075, 2011.

COSGROVE, C. E.; COSGROVE, W. J. **The dynamics of global water futures**. Driving forces 2011–2050. WWDR4: 1–100, UNESCO Paris, 2012. Disponível em: <http://www.unesdoc.unesco.org/images/0021/002153/215377e.pdf>.

CUNHA, N. G.; SILVEIRA, R. J. C.; SEVERO, C. R. S. **Solos e Terras do Planalto Sul-Rio-Grandense e Planícies Costeira**. Pelotas: EMBRAPA, 2006. 43p.

DAGGUPATI, P.; YEN, H.; WHITE, M.; SRINIVASAN, R.; ARNOLD, J.; KEITZER, C.; SOWA, S. Impact of model development, calibration and validation decisions on hydrological simulations in West Lake Erie Basin. **Hydrological Processes**, v. 29, n. 26, p. 5307-5320, 2015.

DAVIE, T. **Fundamentals of Hydrology**. 2^a. ed. New York: Routledge, 2008.

DAVIRON, B.; NANGO, N.; MURPHY, S.; RASHID, S. **Price volatility and food security**. A report by the High Level Panel of Experts on Food Security and Nutrition of the committee on World Food Security. Rome: CFS-HLPE, 2011. 83 p. (HLPE report, 1).

DÖLL, P.; DOUVILLE, H.; GUNTNER, A.; SCHMIED, H.; WADA, Y. Modelling freshwater resources at the global scale: Challenges and prospects. **Surveys in Geophysics**, v. 37, n. 2, p. 195-221, 2016.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília, 2014. 376p.

EMBRAPA FLORESTAS. Sistema de Produção, 4 (ISSN 1678-8281 Versão eletrônica). Maio/2014. Disponível em: goo.gl/ogcNxG

FAHAD, M.; ISLAM, A.; NAZARI, R.; HASAN, M.; ISLAM, G.; BALA, S. Regional changes of precipitation and temperature over Bangladesh using bias-corrected multi-model ensemble projections considering high-emission pathways. **International Journal of Climatology**, v. 38, n. 4, p. 1634-1648, 2018.

FARR, T. G. et al. The Shuttle Radar Topography Mission. *Reviews of Geophysics*, v. 45, n. 2, RG2004, 2007.

FEREIDOON, M.; KOCH, M. SWAT-MODSIM-PSO optimization of multi-crop planning in the Karkheh River Basin, Iran, under the impacts of climate change. **Science of The Total Environment**, v. 630, p. 502-516, 2018.

FEYEREISEN, G.; STRICKLAND, T.; BOSCH, D.; SULLIVAN, D. Evaluation of SWAT manual calibration and input parameter sensitivity in the Little River watershed. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 3, p. 843-855, 2007.

FRANCO, A.; BONUMÁ, N. Multi-variable SWAT model calibration with remotely sensed evapotranspiration and observed flow. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 22, 2017.

FRIEDRICH, A. C. NIENCHESKI, L. F.; SANTOS, I. R. Dissolved and particulate metals in Mirim Lagoon, Brazil-Uruguayan border. **Journal of Coastal Research**, p. 1036-1039, 2006.

FUKUNAGA, D.; CECÍLIO, R.; ZANETTI, S.; OLIVEIRA, L.; CAIADO, M. Application of the SWAT hydrologic model to a tropical watershed at Brazil. **Catena**, v. 125, p. 206-213, 2015.

FÜSSEL, H.; JOL, A. Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2012: an indicator-based report. EEA Report, v. 12, 2012.

GIORGI, F.; MEARNS, L. O. Calculation of average, uncertainty range, and reliability of regional climate changes from AOGCM simulations via the “reliability ensemble averaging” (REA) method. **Journal of Climate**, v. 15, n. 10, p. 1141-1158, 2002.

GIORGI, F.; JONES, C.; ASRAR, G. Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework. **World Meteorological Organization (WMO) Bulletin**, v. 58, n. 3, p. 175, 2009.

GITHUI, F.; SELLE, B.; THAYALAKUMARAN, T. Recharge estimation using remotely sensed evapotranspiration in an irrigated catchment in southeast Australia. **Hydrological Processes**, v. 26, n. 9, p. 1379-1389, 2012.

GOLMOHAMMADI, G.; RUDRA, R.; DICKINSON, T.; GOEL, P.; VELIZ, M.
Predicting the temporal variation of flow contributing areas using SWAT. *Journal of Hydrology*, v. 547, p. 375-386, 2017.

GREEN, C.; TOMER, M.; DI LUZIO, M.; ARNOLD, J. Hydrologic evaluation of the Soil and Water Assessment Tool for a large tile-drained watershed in Iowa. **Transactions of the ASABE**, v. 49, n. 2, p. 413-422, 2006.

GRÜTZMACHER, D.; GRÜTZMACHER, A.; AGOSTINETTO, D.; LOECK, A.; ROMAN, R.; PEIXOTO, S.; ZANELLA, R. Monitoramento de agrotóxicos em dois mananciais hídricos no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 6, p. 632-638, 2008.

GUDMUNDSSON, L. et al. Comparing large-scale hydrological model simulations to observed runoff percentiles in Europe. **Journal of Hydrometeorology**, v. 13, n. 2, p. 604-620, 2012.

GUPTA, H.; SOROOSHIAN, S.; YAPO, P. Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 4, n. 2, p. 135-143, 1999.

HE, C. Integration of geographic information systems and simulation model for watershed management. **Environmental Modelling & Software**, v. 18, n. 8-9, p. 809-813, 2003.

HERNANDES, T.; SCARPARE, F.; SEABRA, J. Assessment of impacts on basin stream flow derived from medium-term sugarcane expansion scenarios in Brazil. **Agriculture, ecosystems & environment**, v. 259, p. 11-18, 2018.

HILLMAN, G.; RODRIGUEZ, A.; PAGOT, M.; TYRRELL, D.; CORRAL, M.; ORONÁ, C.; MOLLER, O. 2D Numerical Simulation of Mangueira Bay Hydrodynamics. **Journal of Coastal Research**, p. 108-115, 2007.

IPCC. **Climate change 2007: the physical science basis**. Contribution of Working group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on climate change. In: Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M, Miller HL (eds). Cambridge University Press, Cambridge and New York, 2007. 996p.

IPCC. **Climate change 2013: the physical science basis**. Contribution of Working group I to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on climate change. In: stocker TF, Qin D, Plattner G-K, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels a, Xia Y, Bex V, Midgley PM (eds). Cambridge University Press, Cambridge and New York, 2013. 1535p.

JHA, M.; ARNOLD, J.; GASSMAN, P.; GIORGI, F.; GU, R. Climate change sensitivity assessment on upper Mississippi river basin streamflows using SWAT 1. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 42, n. 4, p. 997-1015, 2006.

JU, Q.; YU, Z.; HAO, Z.; OU, G.; WU, Z.; YANG, C.; GU, H. Response of hydrologic processes to future climate changes in the Yangtze River Basin. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 19, n. 1, p. 211-222, 2012.

KARLSSON, I.; SONNENBORG, T.; REFSGAARD, J.; TROLLE, D.; BORGESEN, C.; OLESEN, J.; JEPPESEN, E.; JENSEN, K. Combined effects of climate models, hydrological model structures and land use scenarios on hydrological impacts of climate change. **Journal of Hydrology**, v. 535, p. 301-317, 2016.

KENDALL, M. G. **Rank Correlation Methods**. London: Charles Griffin, 1975.

LI, Q. et al. Building Asian climate change scenario by multi-regional climate models ensemble. Part II: mean precipitation. **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 13, p. 4253-4264, 2016.

LU, G.; XIAO, H.; WU, Z.; ZHANG, S.; LI, Y. Assessing the impacts of future climate change on hydrology in Huang-Huai-Hai region in China using the PRECIS and VIC models. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 18, n. 9, p. 1077-1087, 2012.

LUDWIG, F.; VAN SLOBBE, E.; COFINO, W. Climate change adaptation and Integrated Water Resource Management in the water sector. **Journal of Hydrology**, v. 518, p. 235-242, 2014.

MA, F.; YE, A.; GONG, W.; MAO, Y.; MIAO, C.; DI, Z. An estimate of human and natural contributions to flood changes of the Huai River. **Global and Planetary Change**, v. 119, p. 39-50, 2014.

MALAGÓ, A.; BOURAOU, F.; VIGIAK, O.; GRIZZETTI, B.; PASTORI, M. Modelling water and nutrient fluxes in the Danube River Basin with SWAT. **Science of The Total Environment**, v. 603, p. 196-218, 2017.

MANN, H. B. Nonparametric tests against trend. **Econometrica**, v. 13, p. 245-259, 1945.

MARENGO, J.; AMBRIZZI, T.; ROCHA, R.; ALVES, L.; CUADRA, S.; VALVERDE, M.; TORRES, R.; SANTOS, D.; FERRAZ, S. Future change of climate in South America in the late twenty-first century: intercomparison of scenarios from three regional climate models. **Climate Dynamics**, v. 35, p. 1073-1097, 2010.

MARENGO, J. et al. Development of regional climate future change scenarios in South America using the Eta CPTec/HadCM3 climate change projections: climatology and regional analyses for the Amazon, São Francisco and the Paraná river basins. **Climate Dynamics**, v. 38, p. 1829-1848, 2011.

MEEHL, G.; COVEY, C.; DELWORTH, T.; LATIF, M.; MCAVANEY, B.; MITCHELL, J.; STOUFFER, R.; TAYLOR, K. The WCRP CMIP3 multimodel

dataset: A new era in climate change research. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 88, n. 9, p. 1383-1394, 2007.

MELLO, C. R. D.; SILVA, A. M. D. **Hidrologia: princípios e aplicações em sistemas agrícolas**. 1^a. ed. Lavras: UFLA, 2013. 455 p.

MENDIONDO, E. M.; TUCCI, C. E. Escalas hidrológicas III: hipótese integradora de processos na bacia vertente. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 2, n. 1, p. 59-122, 1997.

MENGISTU, D. T.; SORTEBERG, A. Sensitivity of SWAT simulated streamflow to climatic changes within the Eastern Nile River basin. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 16, n. 2, p. 391-407, 2012.

MILLY, P.; BETANCOURT, J.; FALKENMARK, M.; HIRSCHU, R.; KUNDZEWICZ, Z.; LETTENMAIER, D.; STOUFFER, R. Stationarity is dead: Whither water management? **Science**, v. 319, n. 5863, p. 573-574, 2008.

MORIASI, D. N.; GITAU, M. W.; PAI, N.; DAGGUPATI, P. Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria. **Transactions of the ASABE**, v. 58, n. 6, p. 1763-1785, 2015.

MOUSSA, S.; SELLAMI, H.; MLAYH, A. Climate change impact projections at the catchment scale in Tunisia using the multi-model ensemble mean approach. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 11, n. 8, p. 181, 2018.

MOZAYYAN, M.; AKHOOND, A.; BAVANI, A.; RADMANESH, F.; GOHARI, A. Impacts of Climate Change on Low Flows at Tang Panj Sezar Subbasin, Southwest of Iran. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 22, n. 11, p. 05017021, 2017.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models I: a discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v. 10, n. 3, p. 282-298, 1970.

NEITSCH S.; ARNOLD, J. KINIRY, J.; WILLIAMS, J. **Soil and water assessment tool – theoretical documentation version 2009**. Texas Water Resources Institute Technical Report 406, 2011. 647p.

NETO, A; PAZ, A.; MARENGO, J.; CHOU, S. Hydrological processes and climate change in hydrographic regions of Brazil. **Journal of Water Resource and Protection**, v. 8, n. 12, p. 1103, 2016.

NIU, X. et al. Ensemble evaluation and projection of climate extremes in China using RMIP models. **International Journal of Climatology**, v. 38, n. 4, p. 2039-2055, 2018.

NOBRE, P. et al. Climate Simulations and Change in the Brazilian Climate Model. **Journal of Climate**, v. 26, p. 6716-6732, 2013.

OLIVEIRA, L.; FIOREZE, A. P. Estimativas de vazões mínimas mediante dados pluviométricos na Bacia Hidrográfica do Ribeirão Santa Bárbara, Goiás. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi**, v. 15, n. 1, 2011.

OLIVEIRA, H. Processos Hidrológicos e Hidrodinâmicos da Lagoa Mirim. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, n. 1, p. 34-45, 2014.

OLIVEIRA, V. A. **Impactos antrópicos na hidrologia e no potencial de geração hidroelétrica no Alto Rio Grande - MG**. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas). Universidade Federal de Lavras. Lavras, p. 182. 2016.

OLIVEIRA, V.; MELLO, C.; VIOLA, M.; SRINIVASAN, R. Assessment of climate change impacts on streamflow and hydropower potential in the headwater region of the Grande river basin, Southeastern Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 15, p. 5005-5023, 2017.

OLIVEIRA, V.; MELLO, C.; BESKOW, S.; VIOLA, M.; SRINIVASAN, R. Modeling the effects of climate change on hydrology and sediment load in a headwater basin in the Brazilian Cerrado biome. **Ecological Engineering**, v. 133, p. 20-31, 2019.

PEREIRA, D.; MARTINEZ, M.; SILVA, D.; PRUSKI, F. Hydrological simulation in a basin of typical tropical climate and soil using the SWAT Model Part II: Simulation of hydrological variables and soil use scenarios. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 5, p. 149-163, 2016a.

PEREIRA, D.; MARTINEZ, M.; PRUSKI, F.; SILVA, D. Hydrological simulation in a basin of typical tropical climate and soil using the SWAT model part I: Calibration and validation tests. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 7, p. 14-37, 2016b.

PESQUERO, J.; CHOU, S.; NOBRE, C. MARENGO, J. Climate Downscaling over South America for 1961-1970 Using the Eta Model. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 99, p. 75-93. 2009.

PRUSKI, F. F.; BRANDÃO, V.; SILVA, D. D. **Escoamento superficial**. 1.ed. Viçosa: UFV, 2003. 88p.

RANDALL, D. **General Circulation Model Development: Past, Present and Future**. Academic Press: San Diego, CA, 2000. 781p.

REBOITA, M.; GAN, M.; ROCHA, R.; AMBRIZZI, T. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 2, 2010.

RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. **Conceitos Básicos de Modelagem Hidrológica**. In: Margareth Simões Penello Meirelles; Gilberto Camara; Cláudia Maria de Almeida. (Org.). Geomática: Modelos e Aplicações Ambientais. 1ed. Brasília: EMBRAPA Informação Tecnológica, 2007, v. 11, p. 529-556.

RICHARDS, J. A. **Remote Sensing Digital Image Analysis**. 5th. ed. Berlin - Heidelberg: Springer, 2013. 494 p.

RIDDLE, E.; COOK, K. Abrupt rainfall transitions over the Greater Horn of Africa: Observations and regional model simulations. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 113, n. D15, 2008.

RIENTJES, T.; MUTHUWATTA, L.; BOS, M.; BOOJI, M.; BHATTI, H. Multi-variable calibration of a semi-distributed hydrological model using streamflow data and satellite-based evapotranspiration. **Journal of hydrology**, v. 505, p. 276-290, 2013.

ROUHOLAHNEJAD, E.; ABBASPOUR, K.; VEJDANI, M.; SRINIVASAN, R.; SCHULIN, R.; LEHMANN, A. A parallelization framework for calibration of hydrological models. **Environmental Modelling & Software**, v. 31, p. 28-36, May 2012.

SANGHI, A.; MENDELSON, R. The impacts of global warming on farmers in Brazil and India. **Global Environmental Change**, Washington, v.18, p. 655-665, 2008.

SANTOS, H. I.; OLIVEIRA, L. G.; FIOREZE, A. P. Avaliação das vazões alocáveis na bacia hidrográfica do Rio dos Bois e Sub-Bacia do Rio do Peixe, Estado de Goiás. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.11, n.2, p.47-58, 2006.

SANTOS, T.; MENDES, D.; CASTRO, A.; SILVA, A. Incertezas das projeções de mudanças climáticas: Análise preliminar. **Ciência e Natura**, v. 37, n. 1, 2015.

SANTOS, C.; ALMEIDA, C.; RAMOS, T.; ROCHA, F.; OLIVEIRA, R.; NEVES, R. Using a hierarchical approach to calibrate swat and predict the semi-arid hydrologic regime of northeastern Brazil. **Water**, v. 10, n. 9, p. 1137, 2018.

SANTOS, C.; ROCHA, F.; RAMOS, T.; ALVES, L.; MATEUS, M.; OLIVEIRA, R.; NEVES, R. Using a Hydrologic Model to Assess the Performance of Regional Climate Models in a Semi-Arid Watershed in Brazil. **Water**, v. 11, n. 1, p. 170, 2019.

SCHULER, A. E. **Fluxos hidrológicos em microbacias com floresta e pastagem na Amazônia Oriental, Paragominas, Pará**. Tese (Doutorado em Energia Nuclear na Agricultura). Universidade de São Paulo. Piracicaba, 120p. 2003.

SETEGN, S.; DARGAHI, B.; SRINIVASAN, R.; MELESSE, A. Modeling of Sediment Yield From Anjeni-Gauged Watershed, Ethiopia Using SWAT Model 1. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 46, n. 3, p. 514-526, 2010.

SHRESTHA, S.; SHARMA, S.; GUPTA, R.; BHATTARAI, R. Impact of global climate change on stream low flows: A case study of the great Miami river watershed, Ohio, USA. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 12, n. 1, p. 84-95, 2019.

SHUDDER, K.; CHAUBEY, I.; GARG, V.; MIGLIACCIO, K. Impact of time-scale of the calibration objective function on the performance of watershed models. **Hydrological Processes**, v. 21, n. 25, p. 3409-3419, 2007.

SILVA, J.; PRUSKI, F.; SILVA, D.; CECÍLIO, R. Metodologia para obtenção do hidrograma de escoamento superficial em encostas e canais. Parte I: Desenvolvimento e avaliação. **Engenharia Agrícola**, v. 26, n.3, p.695-703, 2006.

SILVA, A.; OLIVEIRA, P.; MELLO, C.; PIERANGELI, C. Vazões mínimas e de referência para outorga na região do Alto Rio Grande, Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.10, n.2, p.374–380, 2006.

SILVA, P.; MELLO, C.; SILVA, A.; COELHO, G. Modelagem da hidrógrafa de cheia em uma bacia hidrográfica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 3, p. 258-265, 2008.

SILVA, V. et al. Simulation of stream flow and hydrological response to land-cover changes in a tropical river basin. **Catena**, v. 162, p. 166-176, 2018.

SIMONOVIC, S.; LI, L. Sensitivity of the Red River Basin flood protection system to climate variability and change. **Water Resources Management**, v. 18, n. 2, p. 89-110, 2004.

SIMONOVIC, S. Bringing future climatic change into water resources management practice today. **Water Resources Management**, v. 31, n. 10, p. 2933-2950, 2017.

SOOD, A.; SMAKHTIN, V. Global hydrological models: a review. **Hydrological Sciences Journal**, v. 60, n. 4, p. 549-565, 2015.

STEINMETZ, A. A., CASSALHO, F., CALDEIRA, T. L., OLIVEIRA, V. A. D., BESKOW, S.; TIMM, L. C. Assessment of soil loss vulnerability in data-scarce watersheds in southern Brazil. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 42, n. 6, p. 575-587, 2018.

STRECK, E. V. et al. **Solos do Rio Grande do Sul**. UFRGS: EMATER/RS-ASCAR, 2008.

TEKLAY, A.; DILE, Y.; SETEGN, S.; DEMISSIE, S.; ASFAW, D. Evaluation of static and dynamic land use data for watershed hydrologic process simulation: A case study in Gummara watershed, Ethiopia. **Catena**, v. 172, p. 65-75, 2019.

TELLES, R. M. **Inundações urbanas nos municípios de Pedro Osório e Cerrito - RS**. Dissertação (Mestrado em Geociências). Universidade Federal do Rio Grande. Porto Alegre, p. 74. 2002.

TEUTSCHBEIN, C.; SEIBERT, J. Regional climate models for hydrological impact studies at the catchment scale: a review of recent modeling strategies.

Geography Compass, v. 4, n. 7, p. 834-860, 2010.

TEXAS A&M, U. ArcSWAT software, ArcSWAT 2012.10.19; 2012.

THIREL, G. et al. Hydrology under change: an evaluation protocol to investigate how hydrological models deal with changing catchments. **Hydrological Sciences Journal**, v. 60, n. 7-8, p. 1184-1199, 2015.

TOBIN, K. J.; BENNETT, M. E. Using SWAT to Model Streamflow in Two River Basins With Ground and Satellite Precipitation Data 1. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 45, n. 1, p. 253-271, 2009.

TRENBERTH, K. E. Changes in precipitation with climate change. **Climate Research**, v. 47, n. 1-2, p. 123-138, 2011.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. 2^a. ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2005. 678 p. ISBN 9788570258236.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4^a. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2009. 943 p. ISBN 9788570259240.

TUO, Y.; MARCOLINI, G.; DISSE, M.; CHIOGNA, G. A multi-objective approach to improve SWAT model calibration in alpine catchments. **Journal of Hydrology**, v. 559, p. 347-360, 2018.

ULLRICH, A.; VOLK, M. Application of the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to predict the impact of alternative management practices on water quality and quantity. **Agricultural Water Management**, v. 96, n. 8, p. 1207-1217, 2009.

YANG, J.; REICHERT, P.; ABBASPOUR, K.; XIA, J.; YANG, H. Comparing uncertainty analysis techniques for a SWAT application to the Chaohe Basin in China. **Journal of Hydrology**, v. 358, n. 1-2, p. 1-23, 2008.

VAN LIEW, M.; VEITH, T.; BOSCH, D.; ARNOLD, J. Suitability of SWAT for the conservation effects assessment project: Comparison on USDA agricultural research service watersheds. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 12, n. 2, p. 173-189, 2007.

VAN VUUREN, D. P. et al. The representative concentration pathways: an overview. **Climatic Change**, v. 109, n. 1-2, p. 5, 2011.

VARGAS-AMELIN, E.; PINDADO, P. The challenge of climate change in Spain: Water resources, agriculture and land. **Journal of Hydrology**, v. 518, p. 243-249, 2014.

VETTER, T. et al. Evaluation of sources of uncertainty in projected hydrological changes under climate change in 12 large-scale river basins. **Climatic Change**, v. 141, n. 3, p. 419-433, 2017.

VIGIAK, O.; MALAGÓ, A.; BOURAOUI, F.; VANMAERCKE, M.; OBREJA, F.; POESEN, J.; HABERSACK, H.; FEHÉR, J.; GROSELJ, S. Modelling sediment fluxes in the Danube River Basin with SWAT. **Science of The Total Environment**, v. 599, p. 992-1012, 2017.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo, McGraw-Hill do Brasil, 1975. 245p.

VIOLA, M. R. et al. Modelagem hidrológica na bacia hidrográfica do rio Aiuruoca, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 5, p. 581-590, 2009.

VIOLA, M. R. **Simulação hidrológica na cabeceira da Bacia Hidrográfica do Rio Grande de cenários de usos do solo e mudanças climáticas A1B**. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas). Universidade Federal de Lavras. Lavras, p. 286. 2011.

VÖRÖSMARTY, C. J. et al. Global threats to human water security and river biodiversity. **Nature**, v. 467, n. 7315, p. 555, 2010.

XU, Y.; ZHANG, X.; RAN, Q.; TIAN, Y. Impact of climate change on hydrology of upper reaches of Qiantang River Basin, East China. **Journal of Hydrology**, v. 483, p. 51-60, 2013.

XU, J.; GAO, Y.; CHEN, D.; XIAO, L.; OU, T. Evaluation of global climate models for downscaling applications centred over the Tibetan Plateau. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 2, p. 657-671, 2017.

WATANABE, M. et al. Improve Climate Simulation by ETA-MIROC5: Mean States, Variability, and Climate Sensitivity. **Journal of Climate**, v. 23, p. 6312-6335, 2010.

WWAP. **Water in a changing world**. The United Nations World Water Development Report 3. 2009. Disponível em:
<http://www.unesco.org/water/wwap/wwdr/wwdr3/index.shtml>.

ZEIGER, S.; HUBBART, J. An assessment of mean areal precipitation methods on simulated stream flow: a SWAT model performance assessment. **Water**, v. 9, n. 7, p. 459, 2017.

ZHANG, X.; XU, Y.; FU, G. Uncertainties in SWAT extreme flow simulation under climate change. **Journal of Hydrology**, v. 515, p. 205-222, 2014.

APÊNDICES

Apêndice A. Resultados do teste de tendência de Mann-Kendall aplicado aos dados de precipitação e temperatura

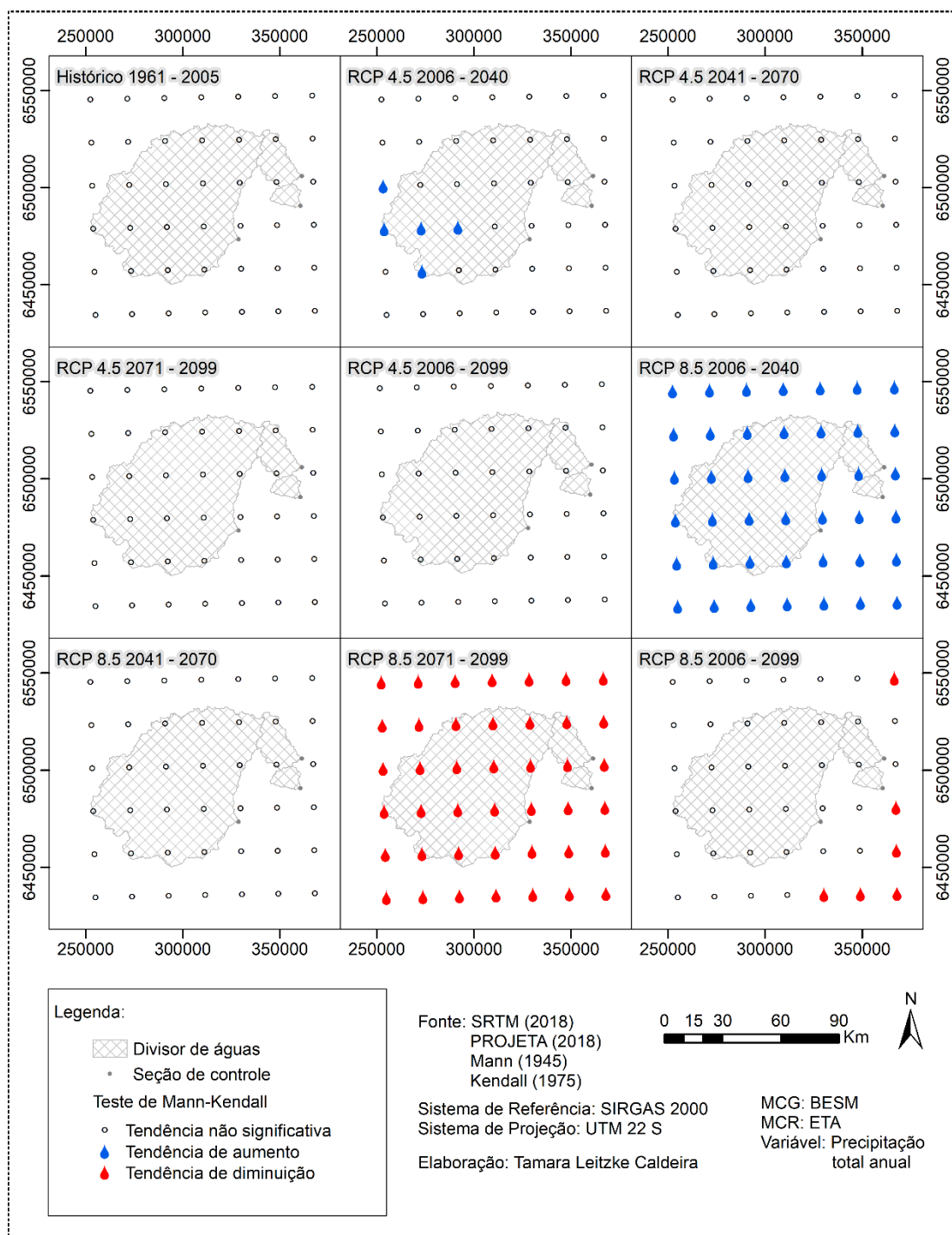


Figura A1– Resultados do teste de tendência de Mann-Kendall aplicado aos dados de precipitação total anual, oriundos do modelo ETA-BESM, para o clima passado (1961-2005) e para os cenários futuros dos RCP's 4.5 e 8.5.

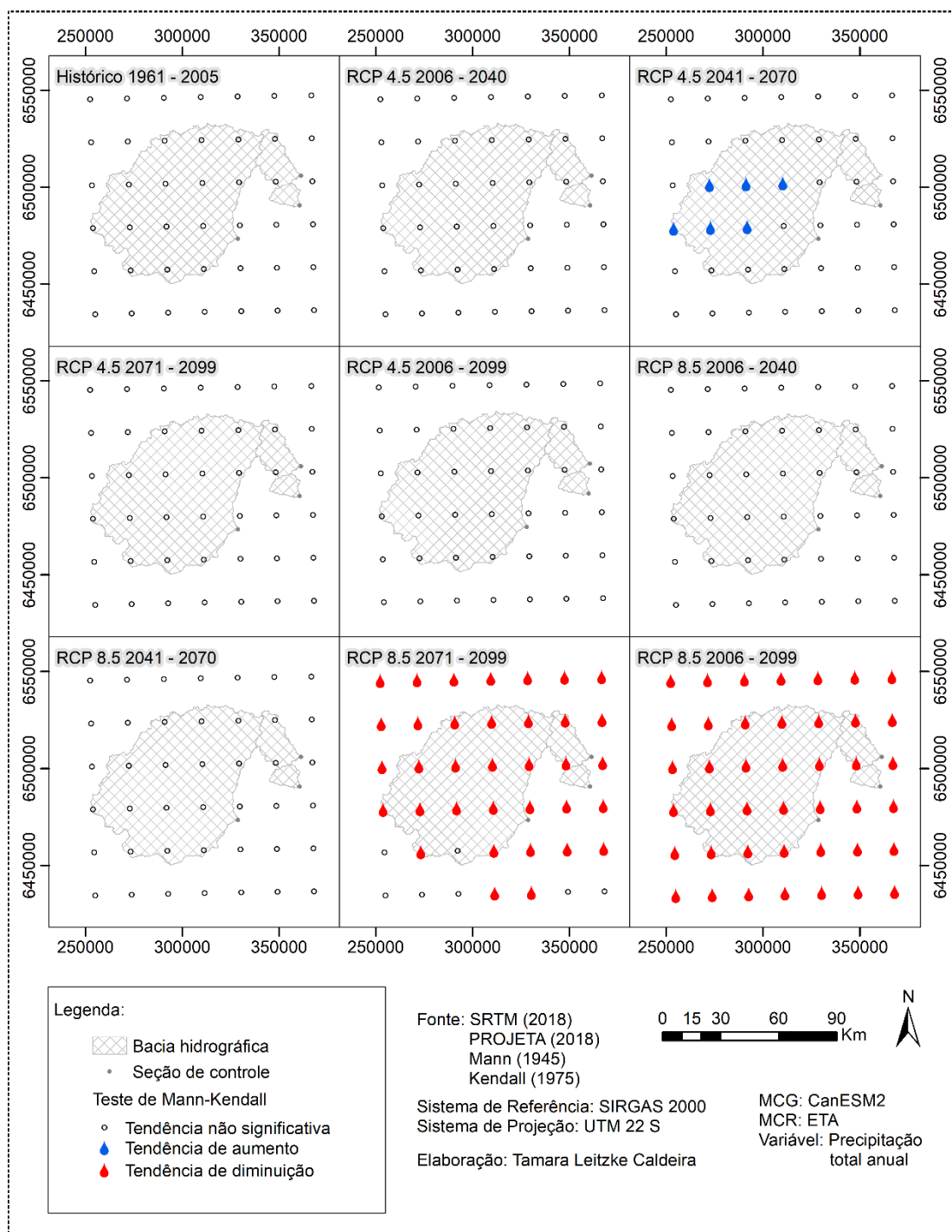


Figura A2 - Resultados do teste de tendência de Mann-Kendall aplicado aos dados de precipitação total anual, oriundos do modelo ETA-CANESM2, para o clima passado (1961-2005) e para os cenários futuros dos RCP's 4.5 e 8.5.

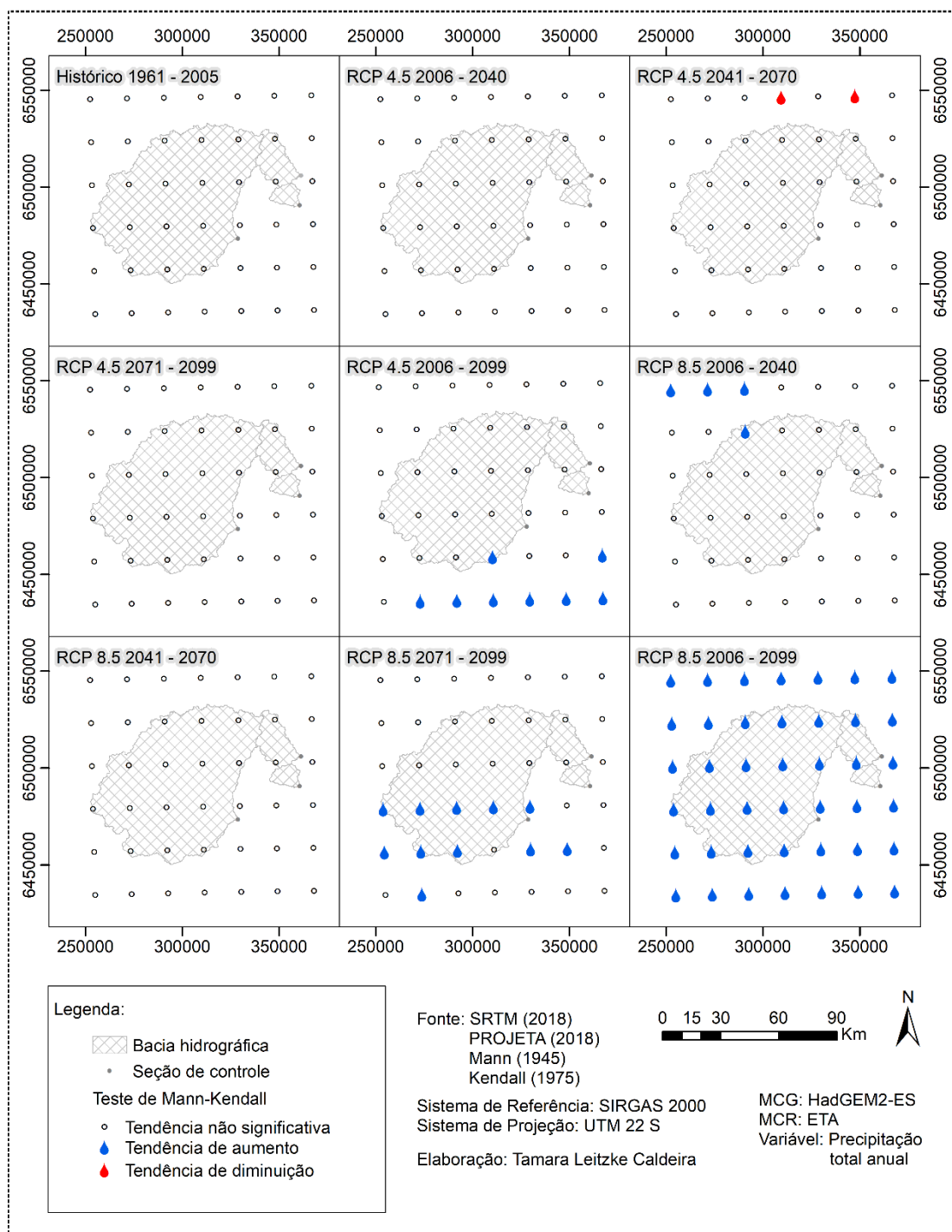


Figura A3 - Resultados do teste de tendência de Mann-Kendall aplicado aos dados de precipitação total anual, oriundos do modelo ETA-HADGEM2-ES, para o clima passado (1961-2005) e para os cenários futuros dos RCP's 4.5 e 8.5.

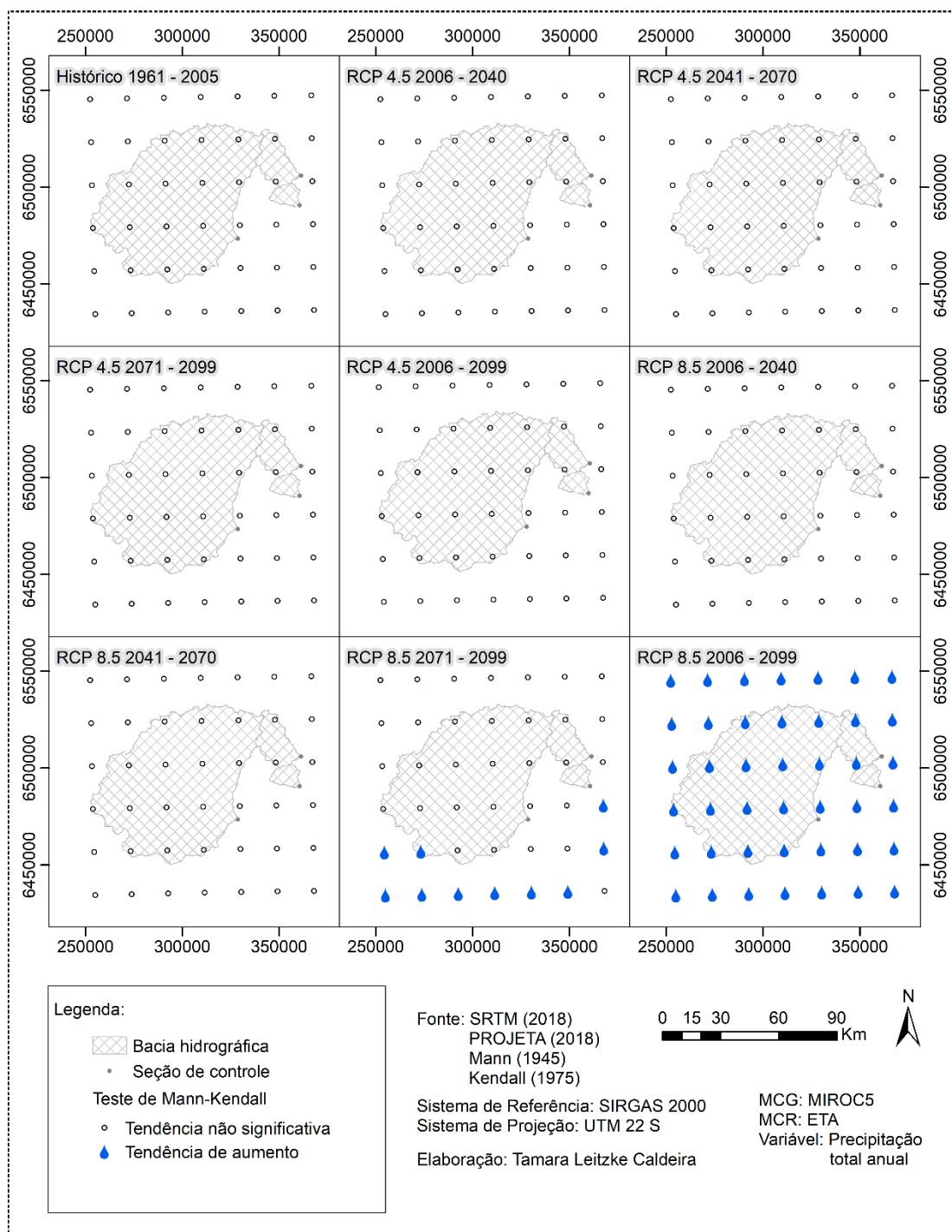


Figura A4 - Resultados do teste de tendência de Mann-Kendall aplicado aos dados de precipitação total anual, oriundos do modelo ETA-MIROC5, para o clima passado (1961-2005) e para os cenários futuros dos RCP's 4.5 e 8.5.

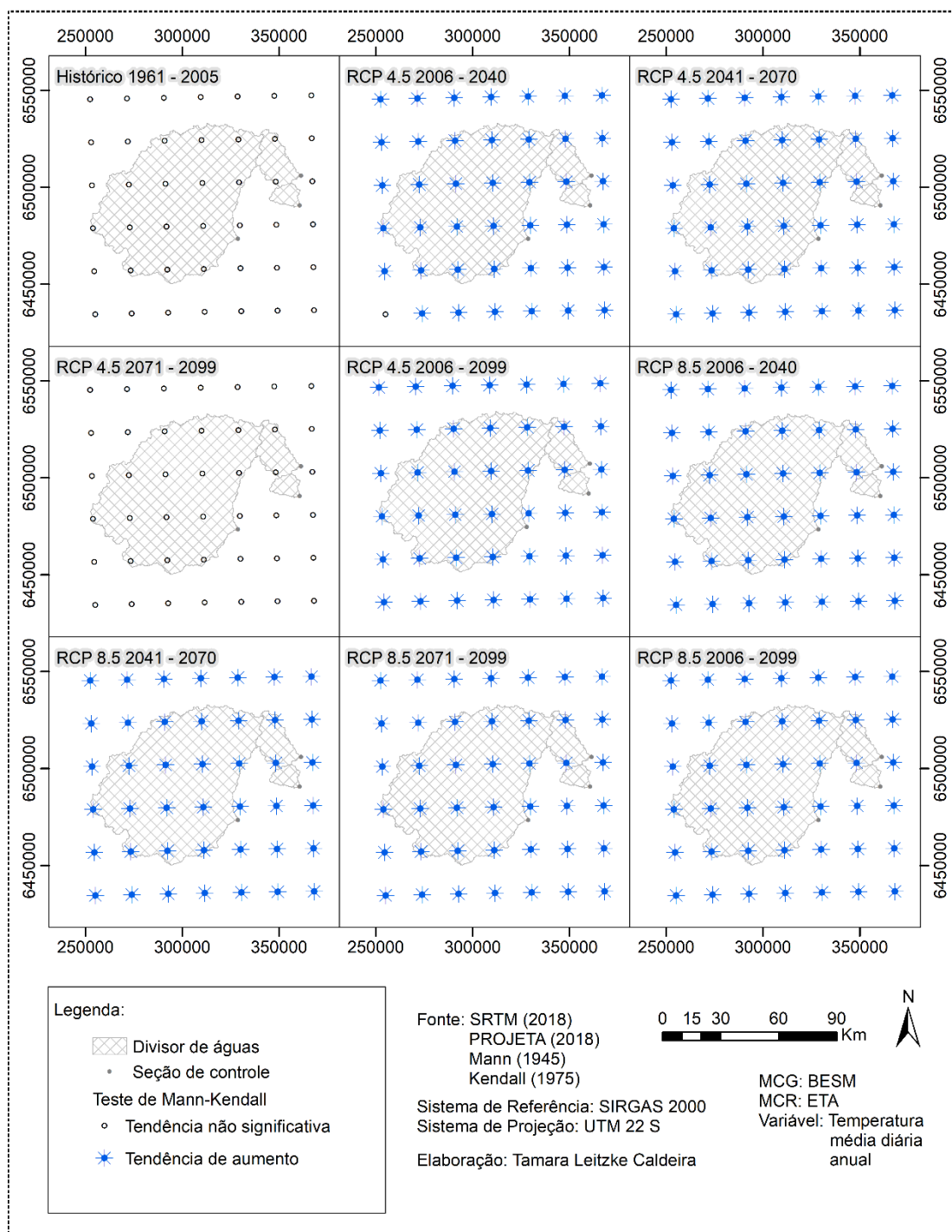


Figura A5 - Resultados do teste de tendência de Mann-Kendall aplicado aos dados de temperatura média diária anual, oriundos do modelo ETA-BESM, para o clima passado (1961-2005) e para os cenários futuros dos RCP's 4.5 e 8.5.

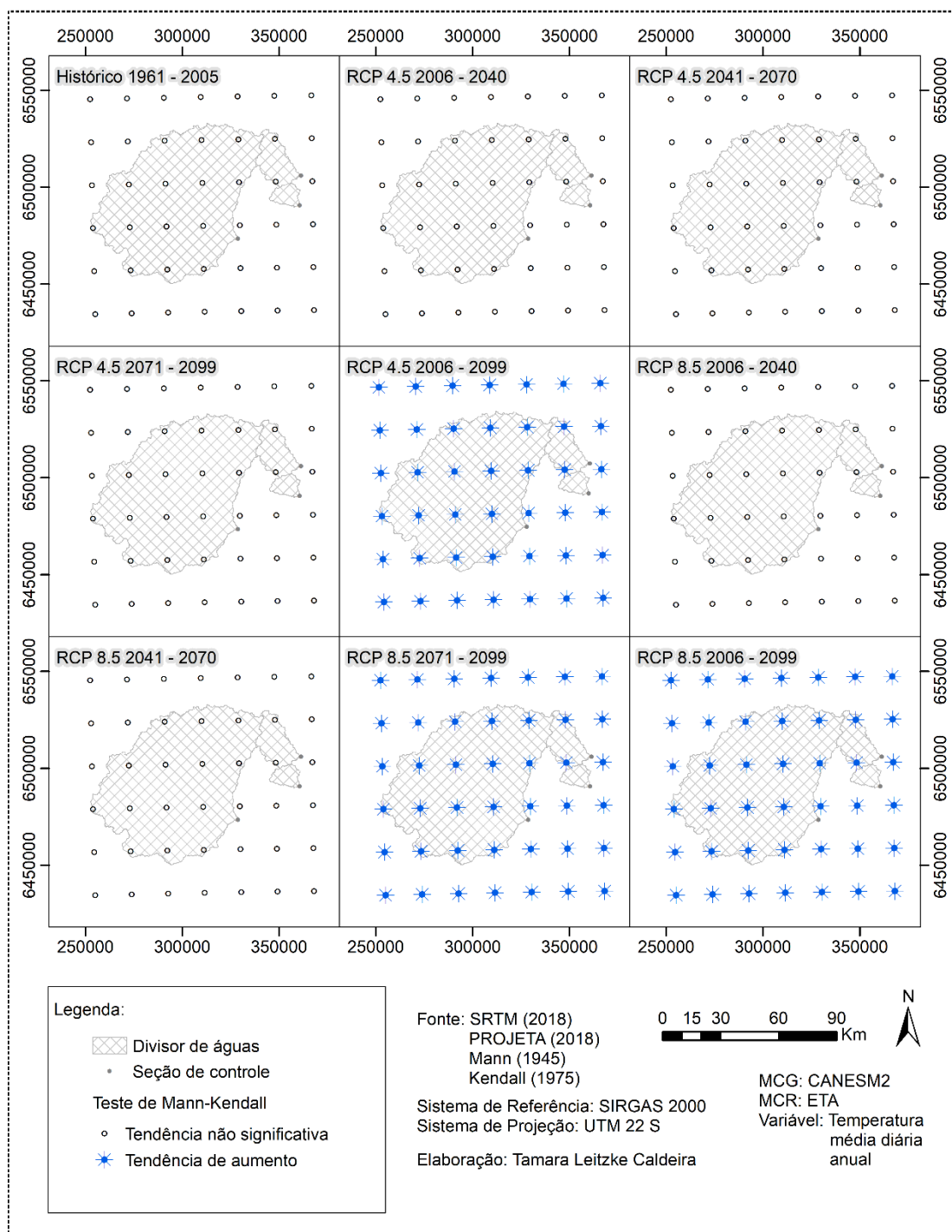


Figura A6 - Resultados do teste de tendência de Mann-Kendall aplicado aos dados de temperatura média diária anual, oriundos do modelo ETA-CANESM2, para o clima passado (1961-2005) e para os cenários futuros dos RCP's 4.5 e 8.5.

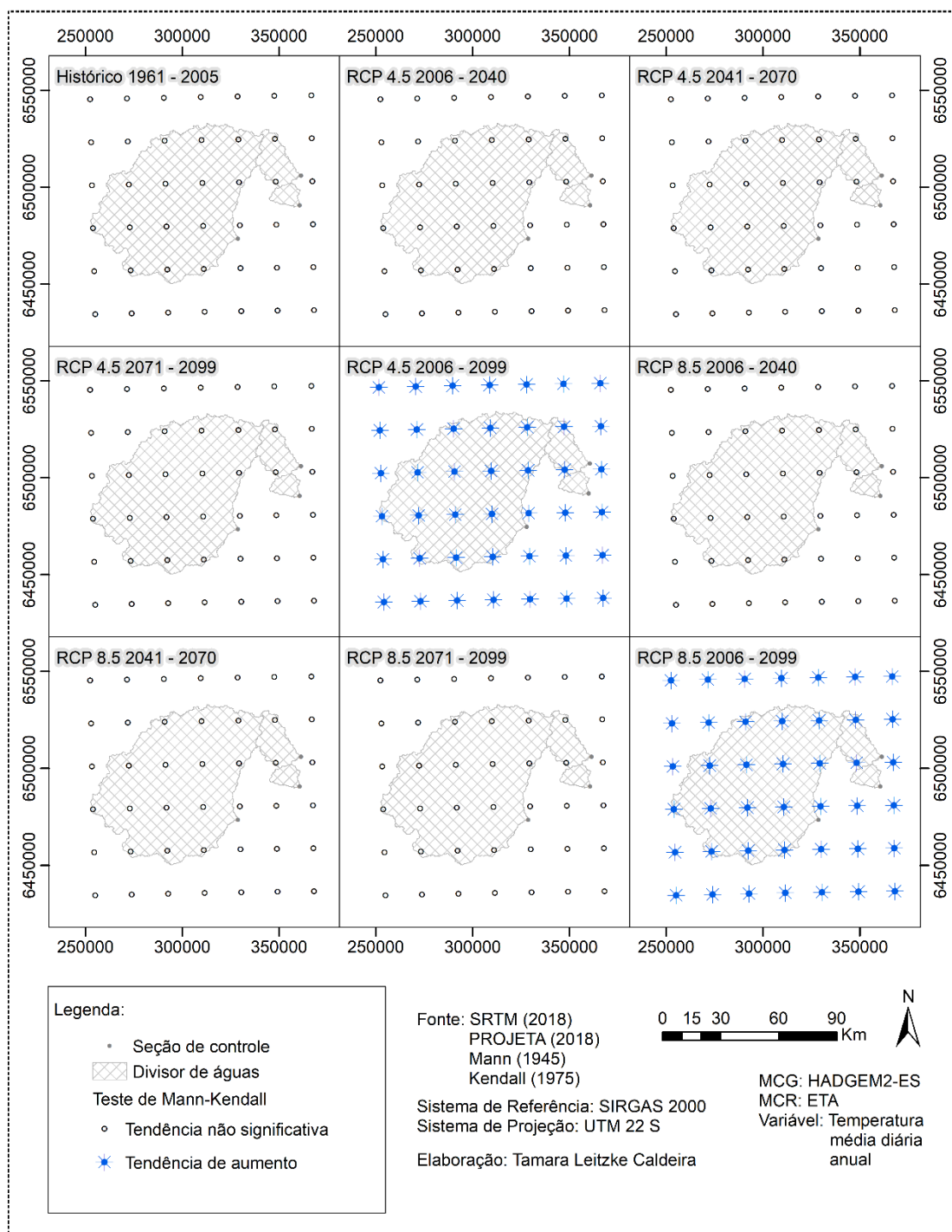


Figura A7 - Resultados do teste de tendência de Mann-Kendall aplicado aos dados de temperatura média diária anual, oriundos do modelo ETA-HADGEM2-ES, para o clima passado (1961-2005) e para os cenários futuros dos RCP's 4.5 e 8.5.

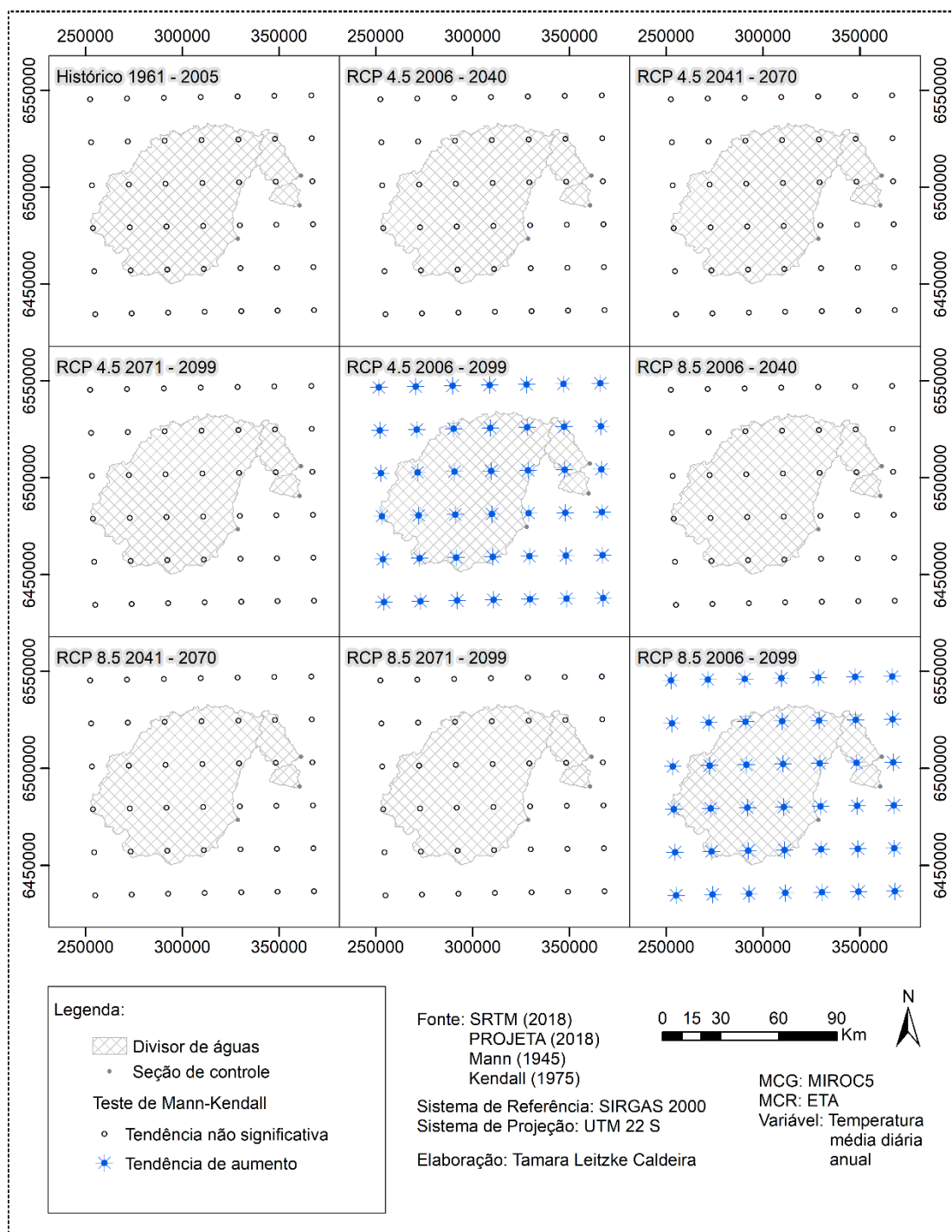


Figura A8 - Resultados do teste de tendência de Mann-Kendall aplicado aos dados de temperatura média diária anual, oriundos do modelo ETA-MIROC5, para o clima passado (1961-2005) e para os cenários futuros dos RCP's 4.5 e 8.5.