



ESTEFÂNIA MARIA SOUSA ZÁKHIA

**IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS EM UMA
BACIA HIDROGRÁFICA NO SUL DO ESTADO DE MINAS
GERAIS**

**LAVRAS – MG
2020**

ESTEFÂNIA MARIA SOUSA ZÁKHIA

**IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS EM UMA BACIA HIDROGRÁFICA
NO SUL DO ESTADO DE MINAS GERAIS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, área de concentração em Hidrologia, para a obtenção do título de Mestre.

Prof(a). Dr(a). Livia Alves Alvarenga
Orientador(a)

Prof. Dr. Javier Tomasella
Coorientador

**LAVRAS – MG
2020**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Zákhia, Estefânia Maria Sousa.

Impactos das mudanças climáticas em uma bacia hidrográfica
no sul do estado de Minas Gerais / Estefânia Maria Sousa Zákhia. -
2020.

90 p. : il.

Orientador(a): Livia Alves Alvarenga.

Coorientador(a): Javier Tomasella.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de
Lavras, 2020.

Bibliografia.

1. Mudanças climáticas. 2. Modelagem Hidrológica. 3. Gestão
de Recursos Hídricos. I. Alvarenga, Livia Alves. II. Tomasella,
Javier. III. Título.

ESTEFÂNIA MARIA SOUSA ZÁKHIA

**IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS EM UMA BACIA HIDROGRÁFICA
NO SUL DO ESTADO DE MINAS GERAIS**

**CLIMATE CHANGE'S IMPACTS IN A WATERSHED IN THE SOUTH OF THE
MINAS GERAIS STATE**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, área de concentração em Hidrologia, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 30 de outubro de 2020.

Dr. Carlos Rogério de Mello UFLA

Dr. Gilberto Coelho UFLA

Dr. Javier Tomasella CEMADEN

Prof(a). Dr(a). Lívia Alves Alvarenga
Orientador(a)

Prof. Dr. Javier Tomasella
Coorientador

**LAVRAS – MG
2020**

*À minha mãe, Virgínia, e ao meu pai, Jorge (em memória),
pelo amor, paciência e carinho. Por terem sido os principais
alicerces que me sustentaram até aqui.
Dedico.*

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras, especialmente ao Departamento de Recursos Hídricos e Saneamento, pela oportunidade ao longo dos anos de trabalho.

À CAPES, pela concessão da bolsa de mestrado e à CNPq pelo financiamento da minha estadia durante dos dias de estágio no Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE).

Aos pesquisadores do INPE, em especial, a equipe do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN), por terem me recepcionado e me auxiliado na implementação do MHD-INPE.

À Minella Martins e Ana Carolina Santos, por terem sido pacientes e me recepcionado nos dias em que precisei estar em Cachoeira Paulista. Serei eternamente grata pelo que fizeram por mim.

À Pâmela Melo, pela ajuda no desenvolvimento inicial desse trabalho.

Ao professor Javier Tomasella, pela coorientação, paciência e amizade.

À professora Lívia Alves Alvarenga, pela orientação, amizade, oportunidades e todo o carinho que sempre teve comigo. Palavras não são suficientes para descrever a gratidão que tenho por ter sido sua orientada.

Aos meus amigos da pós-graduação do programa de Recursos Hídricos da UFLA, em especial, Júlia, Lis e Jaíza, pelo companheirismo e amizade.

A todos os funcionários e professores do Departamento de Recursos Hídricos e Saneamento, em especial, ao professor Carlos Rogério de Mello, pelo auxílio com as questões da bacia hidrográfica do Ribeirão Jaguará.

Aos meus pais, Virgínia e Jorge (*em memória*), por terem me ensinado a persistir nos obstáculos que encontro em minha vida. Às minhas irmãs, Maria Salete e Tatiana, por serem minhas melhores amigas.

A Thiago, pelo carinho, amor e compreensão.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

MUITO OBRIGADA!

RESUMO

As mudanças climáticas no século XXI é uma realidade incontestável. Diversos efeitos e impactos vêm sendo registrados sobre a sociedade em várias regiões do planeta. Em particular, eventos extremos cada vez mais severos estão sendo observados, destacando-se inundações e longos períodos de seca. Assim, este trabalho tem por objetivo avaliar a associação do modelo hidrológico MHD-INPE ao modelo atmosférico Eta/CPTEC, a fim de simular o impacto de mudanças climáticas na Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jaguara (BHRJ), localizada no sul do estado de Minas Gerais. Para tal fim, foram utilizados as projeções de três modelos globais (MCGs) (HadGEM2-ES, MIROC5 e CanESM2), regionalizados (“*downscaling*”) pelo modelo Eta, para os cenários de emissões RCP4.5 e RCP8.5. O modelo MHD-INPE foi calibrado e avaliado usando estatísticas de performance. Os resultados da calibração e validação mostraram uma boa performance do modelo MHD-INPE em simular a vazão da BHRJ no passo de tempo diário. Para eliminar o viés, ou seja, os erros sistemáticos das simulações atmosféricas, utilizou-se a estação meteorológica de Lavras, que apresenta características climáticas similares à bacia estudada, comparando suas observações com as saídas dos modelos climáticos para o clima presente (1961-2005). As correções foram aplicadas para os cenários futuros (RCP4.5 e RCP8.5), os quais foram subdivididos em períodos de tempo (2006-2040, 2041-2070, 2071-2099). Após a correção de viés, as saídas dos cenários foram usadas como entrada no modelo hidrológico. Quanto as projeções climáticas corrigidas, os cenários climáticos futuros resultaram em predominante redução da precipitação ao longo do século XXI. Os resultados das projeções da temperatura média mostraram consenso geral de aumento por parte dos modelos climáticos, em ambos os cenários. De modo geral, os descritores estatísticos da curva de permanência das vazões advindas das projeções do modelo Eta mostraram um bom desempenho do MHD-INPE na simulação do clima presente. O conjunto de modelos climáticos mostraram-se coerentes quanto a redução da vazão média no clima futuro (2006-2040, 2041-2070 e 2071-2099), tanto no RCP4.5 quanto no RCP8.5, em todas as estações do ano, chegando a reduzir 35,1% no verão durante período de 2071-2099 do RCP8.5. O modelo MHD-INPE se mostrou apto a prever impactos decorrentes das mudanças climáticas em bacias de pequeno porte como a BHRJ.

Palavras-chave: modelagem hidrológica, correção de viés, MHD-INPE.

ABSTRACT

Climate change in the 21st century is an undisputed reality. Several effects and impacts have been registered in society in several regions of the planet. In particular, increasingly severe extreme events are being observed, with floods and long periods of drought. This work objective is to evaluate an association of the hydrological model MHD-INPE with the atmospheric model Eta/CPTEC to simulate the impact of climate change in the Jaguara Creek Basin (JCR), located in the south of the state of Minas Gerais. For this purpose, the projections of three global climatic models (GCMs) downscaled by the Eta model (HadGEM2-ES, MIROC5 and CanESM2) were used for the scenarios RCP4.5 and RCP8.5. The MHD-INPE model was calibrated and evaluated using performance statistics. The results of the calibration and validation shows a good performance of the MHD-INPE model in simulating the JCR daily discharge. The Lavras Meteorological Station observations were used to eliminate the bias of atmospheric simulations for the baseline period (1961-2005) because it presents similar characteristics to the studied basin. The bias correction was applied for future scenarios (RCP4.5 and RCP8.5), which were subdivided in time slices (2006-2040, 2041-2070, 2071-2099). The results of the scenarios were used as input to the hydrological model after bias correction. Regarding the corrected climate projections, they resulted in a predominant reduction of the rainfall throughout the 21st century. The results of the projections of temperature showed an increase through the climatic models in both scenarios. In general, the statistical descriptors of the flow duration curve (FDC) resulting from the projections of the Eta model showed a good performance of the MHD-INPE in the simulation of the baseline period. The multi-model's ensemble mean is consistent about of the reduction of the discharge in the future climate (2006-2040, 2041-2070 and 2071-2099), to RCP4.5 and RCP8.5 in all seasons of the year, reaching a reduction of 35.1% in the summer during the 2071-2099 time slice in RCP8.5 scenario. The MHD-INPE model proved to be able to predict impacts resulting from climate change in small basins such as JCR.

Keywords: hydrological modelling, bias correction, MHD-INPE.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 - Esquema da discretização em pontos de grade do modelo climático regional Eta..... 9
- Figura 2 - Forçamento Radiativo Antropogênico Global para o RCP4.5 o RCP8.5, conforme abordado no AR5 (IPCC, 2013).11
- Figura 3 - Localização da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jaguará (BHRJ) no alto da Bacia Hidrográfica do Rio Grande (BHRG) no estado de Minas Gerais.15
- Figura 4 - Modelo digital de elevação (a) e mapa da declividade (b) da BHRJ.16
- Figura 5 - Esquema ilustrativo das etapas de separação de escoamento (esquerda) e do fluxo propagado na rede de drenagem (direita) no modelo hidrológico MHD-INPE. ...17
- Figura 6 - Esquema conceitual do modelo hidrológico MHD-INPE indicando os fluxos e sua direção e as diferentes camadas: superior, com espessura D1; intermediária, com espessura D2; e inferior, com espessura D3.18
- Figura 7 - Delimitação do relevo da BHRJ obtido por meio do modelo HAND.24
- Figura 8 - Mapa de uso e ocupação do solo da BHRJ implementado no modelo MHD-INPE.....25
- Figura 9 - Esquema de representação da correção bias do modelo Eta para a precipitação.....29
- Figura 10 - Distribuição da frequência de excedência da precipitação total (Prec) e da temperatura média (Tmed) da estação meteorológica de Lavras/INMET e da estação meteorológica da BHRJ (a e c), no período de 2006-2014. A verificação de homogeneidade da precipitação total e da temperatura média de ambas as estações (b e d), para o mesmo período, também foi apresentada.31
- Figura 11 - Hidrógrafas para o período de calibração (out/2006 - set/2012) (a) e validação (out/2012 - set/2014) (b) do modelo MHD-INPE no passo de tempo diário.....37
- Figura 12 - Vazões médias diárias acumuladas para os períodos de calibração (2006-2012) (a) e validação (2012-2014) (b) da BHRJ.40
- Figura 13 - Curva de permanência da vazão média diária observada e simulada pelo MHD-INPE na BHRJ. O eixo da vazão está na escala logarítmica.41
- Figura 14 - Precipitação total (Prec) mensal observada (Lavras - INMET), precipitação total mensal sem correção e corrigida (BHRJ) para o clima presente (CP) (1961-2005).

Na sequência, precipitação mensal total corrigida para o clima presente e cenários RCP4.5 e RCP8.5 (2006-2040, 2041-2070 e 2071-2099).	43
Figura 15 - Temperatura média (Tmed) mensal observada (Lavras - INMET), temperatura média mensal sem correção e corrigida (BHRJ) para o clima presente (CP) (1961-2005). Na sequência, temperatura média mensal corrigida para o clima presente e cenários RCP4.5 e RCP8.5 (2006-2040, 2041-2070 e 2071-2099).	44
Figura 16 - Percentual de mudança da precipitação total mensal no clima futuro (2006-2040, 2041-2070 e 2071-2099), sob os cenários RCP4.5 e RCP8.5, em relação ao clima presente (1961-2005) para todos os modelos climáticos.	45
Figura 17 - Percentual de mudança da temperatura média mensal no clima futuro (2006-2040, 2041-2070 e 2071-2099), sob os cenários RCP4.5 e RCP8.5, em relação ao clima presente (1961-2005) para todos os modelos climáticos.	46
Figura 18 - Curva de permanência das vazões simuladas pelo modelo MHD-INPE, utilizando diferentes dados de entrada do modelo Eta, para o clima presente (1961-2005) e o clima futuro (2006-2040, 2041-2070 e 2071-2099), com o cenário RCP4.5. O eixo das vazões está em escala logarítmica.	50
Figura 19 - Curva de permanência das vazões simuladas pelo modelo MHD-INPE, utilizando diferentes dados de entrada do modelo Eta, para o clima presente (1961-2005) e o clima futuro (2006-2040, 2041-2070 e 2071-2099), com o cenário RCP8.5. O eixo das vazões está em escala logarítmica.	51
Figura 20 - Comparação entre os descritores da curva de permanência (MWH, MWL, QSM e SEASON) da vazão simulada pelo MHD-INPE utilizando como entrada os dados meteorológicos de Lavras/INMET (QS) e as projeções do modelo atmosférico Eta (QSClim) para a BHRJ, no período de 1961-2005.	52
Figura 21 - Variabilidade (%) entre os descritores estatísticos da curva de permanência das vazões simuladas pelo MHD-INPE utilizando as projeções futuras (2006-2040, 2041-2070 e 2071-2099), sob os cenários RCP4.5 e RCP8.5, e as projeções do clima presente (1961-2005) dos modelos Eta-HadGEM2-ES, Eta-MIROC5.	54
Figura 22 - Vazão média mensal simulada pelo MHD-INPE, a partir das projeções corrigidas do modelo Eta para a BHRJ no clima presente (CP) (1961-2005) e dos dados meteorológicos de referência (Lavras/INMET) no mesmo período.	56

Figura 23 - Vazão média mensal simulada pelo MHD-INPE, a partir de diferentes entradas, projeções do modelo Eta para a BHRJ no clima presente (CP-1961-2005) e para os cenários RCP4.5 e RCP8.5 (2006-2040, 2041-2070 e 2071-2099).	58
Figura 24 - Percentual de mudança da vazão simulada pelo MHD-INPE para o clima futuro (2006-2040, 2041-2070 e 2071-2099), nos cenários RCP4.5 e RCP8.5, em relação ao clima presente (1961-2005) para todos os modelos climáticos.	59
Figura 25 - Trajetórias temporais da dispersão de ε ($ET_R/PREC$) versus ϕ ($ET_P/PREC$) ao longo da curva de Budyko para o RCP4.5 (a) e RCP8.5 (b) dos modelos Eta-HadGEM2-ES, Eta-MIROC5 e Eta-CanESM2.	62
Figura 26 - Umidade relativa do ar (UR) mensal observada (Lavras - INMET), umidade relativa do ar mensal sem correção e corrigida (BHRJ) para o clima presente (CP) (1961-2005). Na sequência, umidade relativa do ar mensal corrigida para o clima presente e cenários RCP4.5 e RCP8.5 (2006-2040, 2041-2070 e 2071-2099).....	74
Figura 27 - Velocidade do vento (Vv) mensal observada (Lavras - INMET), velocidade do vento mensal sem correção e corrigida (BHRJ) para o clima presente (CP) (1961-2005). Na sequência, velocidade do vento mensal corrigida para o clima presente e cenários RCP4.5 e RCP8.5 (2006-2040, 2041-2070 e 2071-2099).	75
Figura 28 - Radiação global (RG) mensal observada (Lavras - INMET), radiação global mensal sem correção e corrigida (BHRJ) para o clima presente (CP) (1961-2005). Na sequência, radiação global mensal corrigida para o clima presente e cenários RCP4.5 e RCP8.5 (2006-2040, 2041-2070 e 2071-2099).	76
Figura 29 - Pressão a superfície (Pressão) mensal observada (Lavras - INMET), pressão a superfície mensal sem correção e corrigida (BHRJ) para o clima presente (CP) (1961-2005). Na sequência, pressão a superfície mensal corrigida para o clima presente e cenários RCP4.5 e RCP8.5 (2006-2040, 2041-2070 e 2071-2099).	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Aplicações utilizando o modelo MHD-INPE em diferentes bacias hidrográficas.....	6
Tabela 2 - Detalhamento dos modelos climáticos globais.	8
Tabela 3 - Descrição dos parâmetros do Modelo Hidrológico Distribuído (MHD-INPE), contendo suas respectivas unidades e intervalos de variação.	21
Tabela 4 - Classificação dos índices estatísticos para avaliação do desempenho de modelos hidrológicos.	27
Tabela 5 - Descritores estatísticos utilizados na vazão simulada pelo MHD-INPE.	33
Tabela 6 - Parâmetros finais do modelo hidrológico MHD-INPE para a BHRJ no passo de tempo diário e suas respectivas amplitudes de calibração.	35
Tabela 7 - Parâmetros fixos de solo modelo MHD-INPE.	35
Tabela 8 - Parâmetros fixos de vegetação do modelo MHD-INPE.	38
Tabela 9 - Índices estatísticos obtidos para a calibração (out/2006 - set/2012) e validação (out/2012 - set/2014) do modelo MHD - INPE no passo de tempo diário.....	39
Tabela 10 - Índices estatísticos Nash e Sutcliffe (NSE) e porcentagem bias (PBIAS) da calibração e da validação diária em trabalhos utilizando o MHD-INPE e na aplicação de modelos hidrológicos na BHRJ.	39
Tabela 11 - Percentual da mudança da precipitação total e da temperatura média sazonal, projetado no clima futuro (2006-2040, 2041-2070 e 2071-2099) em relação ao clima presente (1961-2005) referentes a média sazonal do conjunto de modelos climáticos para a BHRJ.	47
Tabela 12 - Vazão média mensal das estações seca (abril a setembro) e chuvosa (outubro a março) do clima presente (1961-2005) dos modelos climáticos comparada a vazão média mensal do período de observação (2006-2014) da BHRJ.....	56
Tabela 13 - Percentual da mudança da vazão simulada pelo MHD-INPE, projetado no clima futuro (2006-2040, 2041-2070 e 2071-2099) em relação ao clima presente (1961-2005) referentes a média sazonal do conjunto de modelos climáticos para a BHRJ.....	60

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
2.	REFERENCIAL TEÓRICO	3
2.1.	Estudos hidrológicos na Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jaguará.....	3
2.2.	Modelagem hidrológica com o MHD-INPE	5
2.3.	Modelos climáticos.....	7
2.4.	O modelo climático regional Eta	9
2.5.	Cenários Representativos de Concentração	10
2.6.	Projeções climáticas com relatórios de avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC).....	11
3.	METODOLOGIA	14
3.1.	Caracterização da área de estudo	14
3.2.	O Modelo Hidrológico Distribuído (MHD-INPE)	16
3.3.	Dados de entrada e implementação do modelo hidrológico MHD-INPE.....	22
3.4.	Calibração, validação e análise de desempenho do MHD-INPE.....	25
3.5.	Projeções das mudanças climáticas.....	27
3.6.	Correção das projeções de mudanças climáticas do modelo ETA	28
3.7.	Análise estatística de extremos e avaliação dos impactos de mudanças climáticas.....	32
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	35
4.1.	Calibração e aplicação do modelo hidrológico.....	35
4.2.	Correção de erros sistemáticos e projeções climáticas	41
4.3.	Vazão simulada pelo MHD-INPE	48
4.4.	Considerações finais	62
5.	CONCLUSÕES.....	63
6.	REFERÊNCIAS.....	65
	APÊNDICE A – Projeções climáticas corrigidas requeridas pelo MHD-INPE....	73

1. INTRODUÇÃO

A água é fundamental para a manutenção da vida e, por isso, é relevante saber como ela se distribui no planeta e como funciona sua dinâmica de circulação de um meio para outro. Estima-se que cerca de 3% da água disponível na Terra é composta por água doce, a qual aproximadamente 69% estão nas regiões glaciares, 30% apresentam-se na forma de água subterrânea, 0,3% na forma água superficial (rios e lagos) e 0,6% encontram-se em pântanos, solos, vapor d'água etc. Tais valores remetem a grande importância de se preservar os recursos hídricos na Terra, atentando-se para sua disponibilidade e qualidade (VON SPERLING, 2014).

No Brasil, a região Sudeste, a qual possui a maior densidade populacional do país, sofreu uma grave crise hídrica nos anos hidrológicos 2013/2014 e 2014/2015, devido à redução drástica da precipitação e altas temperaturas no verão. A crise hídrica pode ser associada a uma série de fatores, como: desigualdades socioespaciais, infraestrutura deficiente, políticas inadequadas para a gestão de recursos hídricos, falta de conscientização ambiental, desmatamento da Mata Atlântica, dentre outros (ALVARENGA et al., 2018; MARENGO et al., 2015).

Ainda é possível elencar a interferência antrópica sobre o uso e ocupação do solo e os efeitos advindos das mudanças climáticas. Dessa forma, a compreensão e modelagem das complexas inter-relações entre a dinâmica da água, a paisagem e o clima são essenciais em ações de mitigação e adaptação (OLIVEIRA et al., 2017).

Neste contexto, os modelos hidrológicos têm sido capazes de representar adequadamente a realidade física existente nos processos hidrológicos de interesse e constituem-se ferramentas indispensáveis para o manejo ambiental (GOMES et al., 2008; VIOLA et al., 2013). Estudos como o de Mello et al. (2016) e Oliveira et al. (2017) inferem sobre a interação entre os modelos hidrológicos e os Sistemas de Informações Geográficas (SIG), que, conjuntamente com as técnicas de sensoriamento remoto, tornam a simulação hidrológica uma alternativa viável para a análise e compreensão do comportamento hidrológico sob condições antrópicas ou naturais. Portanto, os modelos hidrológicos têm sido utilizados para avaliar os impactos na hidrologia decorrentes de mudanças no uso e ocupação do solo e de mudanças climáticas.

A problemática envolvendo as mudanças climáticas retrata um dos maiores desafios para a humanidade no decorrer do século XXI. Conforme abordado pelo Painel

Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2007; 2013), as mudanças no clima podem aumentar a frequência e a intensidade de eventos climáticos extremos e podem afetar a duração dos períodos de estiagem e a magnitude das enchentes, além de outras consequências, como o decaimento da produção agrícola, disseminação de doenças e significativas alterações na disponibilidade hídrica em diversas regiões (CASAGRANDE et al., 2017; LELIS et al., 2011; MARTINS et al., 2018; MARTINS; TOMASELLA; DIAS, 2019; SIQUEIRA JÚNIOR; TOMASELLA; RODRIGUEZ, 2015).

Os grupos de climatologia científica de maior relevância no mundo, incluindo a Organização das Nações Unidas (ONU), concordam com as previsões de mudanças climáticas para o final do século XXI, devido ao avanço no conhecimento sobre modelos de simulação climática. Os modelos climáticos simulam as propriedades dinâmicas físicas e químicas da atmosfera com uma precisão aceitável e tornaram-se uma ferramenta científica indispensável para auxiliar o conhecimento sobre possíveis mudanças nos padrões climáticos do planeta (MELLO et al, 2015).

As mudanças climáticas envolvem interações complexas em escala global que impactam o balanço de água e energia em escalas menores. Os efeitos das mudanças climáticas nos recursos hídricos já foram estudados utilizando os cenários RCPs (*Representative Concentration Pathways*) na região do Alto Rio Grande, a qual encontra-se no sul do estado de Minas Gerais (MELLO et al., 2015; OLIVEIRA et al.; 2017, VIOLA et al., 2015). No entanto, tais efeitos podem ser melhor avaliados em bacias de pequeno porte, sendo possível inferir sobre os impactos das mudanças climáticas no cotidiano daqueles que utilizam os recursos hídricos para diferentes atividades na região especificada. Além disso, em bacias de pequeno porte os estudos são escassos e, por isso, estas requerem atenção especial.

Nesse contexto, optou-se por avaliar as projeções climáticas na Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jaguara (BHRJ), localizada na região Alto do Rio Grande, por tratar-se de uma bacia de pequeno porte (33 km²) representativa de Latossolos e uso dos solos típicos desta região, a qual vem sendo severamente degradada ao longo dos últimos anos (ALVES et al., 2019).

O Modelo Hidrológico Distribuído (MHD-INPE) (RODRIGUEZ; TOMASELLA, 2016) foi desenvolvido no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e tem sido aplicado em simulações hidrológicas de bacias hidrográficas de pequeno (MELO, 2020), médio (CASAGRANDE et al., 2017; SILVA et al., 2015) e grande porte (FALCK et al., 2015; SIQUEIRA JÚNIOR; TOMASELLA; RODRIGUEZ, 2015) no Brasil recentemente e se destaca pela possibilidade de ser alimentado pelo modelo atmosférico Eta/CPTEC. No

entanto, esse é o primeiro trabalho em uma bacia de pequeno porte (BHRJ) utilizando esse modelo e as projeções do Quinto Relatório de Avaliação (AR5) (IPCC, 2013).

Considerando as premissas elencadas anteriormente, esse estudo foi realizado com os seguintes objetivos: (i) aplicação do modelo hidrológico MHD-INPE e avaliação do desempenho do mesmo na BHRJ; (ii) verificar as saídas dos modelos climáticos, corrigir erros sistemáticos e identificar a tendência do clima ao longo do século XXI, para os cenários RCP4.5 e RCP8.5, projetados pelos modelos climáticos regionais Eta-HadGEM2-ES, Eta-MIROC5 e Eta-CanESM2, em 20 km de resolução horizontal; (iii) analisar os possíveis impactos hidrológicos das mudanças climáticas na vazão futura da BHRJ simuladas pelo MHD-INPE.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Estudos hidrológicos na Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jaguara

A bacia hidrográfica do presente estudo é uma área experimental, que vem sendo monitorada desde 2006 pelo setor de Engenharia de Água e Solo, da Universidade Federal de Lavras com apoio da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) e da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). A Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jaguara (BHRJ) possui ocupação predominantemente rural e apresenta características pedológicas, hidrológicas e de ocupação dos solos típicas da região do Alto Rio Grande, na região sul de Minas Gerais (ANDRADE; MELLO; BESKOW, 2012).

Beskow et al. (2011a) avaliaram o desempenho do modelo semiconceitual distribuído *Lavras Simulation of Hydrology Model* (LASH) na BHRJ. O modelo foi calibrado para o período de 2006-2007 e validado no período de 2008-2009. Além disso, investigaram se o método de otimização *Shuffled Complex Evolution* (SCE-UA) apresentava eficiência quando aplicado no modelo LASH. Os autores concluíram que o modelo LASH apresentou desempenho adequado para simular a vazão da BHRJ, chegando a obter um coeficiente Nash-Sutcliffe (NSE) de 0,820 e 0,764 para a calibração e validação, respectivamente. Quanto ao método SCE-UA, observaram que este demonstrou-se eficiente quando acoplado ao modelo LASH.

Andrade, Mello e Beskow (2012) aplicaram e testaram o modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) com a finalidade de obter resultados associados à viabilidade do

uso deste modelo na BHRJ. O modelo seguiu uma sequência de procedimentos recomendados, como análise de sensibilidade, calibração (2006-2008) e validação (2008-2009). O estudo mostrou que dentre os parâmetros mais sensíveis do SWAT, pode-se elencar o escoamento superficial, o escoamento base e a evapotranspiração. Os autores puderam observar após a análise de sensibilidade que os parâmetros estão de acordo com a predominância dos processos hidrológicos na BHRJ, ocorrendo predominância de escoamento de base, seguido do escoamento superficial direto. Ademais, o modelo SWAT foi calibrado e validado adequadamente, obtendo-se valores de NSE de 0,660 na calibração e 0,872 na validação.

Beskow et al. (2018) avaliaram a capacidade preditiva de dois modelos conceituais de hidrogramas unitários instantâneos (HUI) (NASH e Clark) e suas vantagens em relação a dois modelos tradicionais de hidrogramas unitários (HU) (Triangular e Adimensional). O estudo foi realizado em duas bacias hidrográficas brasileiras as quais possuem características geomorfológicas e climáticas contrastantes: Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jaguará (BHRJ) e Bacia Hidrográfica do Rio Cadeia (BHRC), localizada no estado de Rio Grande do Sul. O HUI de Clark gerou os hidrogramas de escoamento superficial direto mais precisos para ambas as bacias, seguido pelo HUI de Nash. Estes modelos apresentaram superioridade em relação aos HU (Triangular e Adimensional) e aos HUI geomorfológicos de Nash e Clark. No entanto, os autores ressaltam que estes modelos não são recomendados para serem aplicados na modelagem de inundação nas bacias analisadas.

Alves et al. (2019) avaliaram diferentes metodologias de aplicação do método CN, desenvolvido pelo Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos (CN-SCS), atualmente chamado de Serviço de Conservação dos Recursos Naturais (NRCS), baseados em eventos observados de chuva-deflúvio na BHRJ. O coeficiente de abstração inicial (λ) foi avaliado para a bacia usando 15 metodologias para caracterização do CN, baseando-se nos valores de CN publicados na Seção 4 do *National Engineering Handbook* e, também, por meio de 166 eventos de precipitação monitorados na BHRJ. Dentre os principais resultados, observa-se que um valor de CN fixo representando toda a bacia hidrográfica indicou baixa precisão, mesmo quando a condição de escoamento antecedente foi considerada. Apesar disso, a metodologia baseada na calibração para os eventos hidrológicos observados proporcionou bons resultados.

2.2. Modelagem hidrológica com o MHD-INPE

Os processos hidrológicos de uma bacia hidrográfica apresentam natureza complexa e, em alguns casos, não são totalmente conhecidos, o que faz com que a sua representação matemática apresente limitações, sendo necessárias simplificações e parametrizações desses processos.

Tucci (1998) afirma que um modelo hidrológico faz com que seja possível equacionar, representar, entender e simular o comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica. Modelos hidrológicos são classificados conforme os diferentes aspectos que os caracterizam, como: tipos de variáveis utilizadas no modelo (estocástico ou determinístico), a relação entre essas variáveis (empírico ou conceitual), a forma de representar os dados (discretos ou contínuos), a existência ou não de relações espaciais (pontuais ou distribuídos) e a existência de dependência temporal (estatísticos ou dinâmicos) (LUCAS et al., 2009).

O Modelo Hidrológico Distribuído (MHD-INPE) trata-se de um modelo determinístico e distribuído. Apresentou resultados satisfatórios ao simular condições históricas de previsão de vazão em bacias de grande escala (MOHOR et al., 2015), em estudos com mudanças de uso e ocupação do solo (RODRIGUEZ; TOMASELLA, 2016), utilizando projeções de mudanças climáticas (SIQUEIRA JÚNIOR; TOMASELLA; RODRIGUEZ, 2015) e prognóstico de vazões (FALCK et al., 2015).

A Tabela 1 sumariza alguns trabalhos que utilizaram o MHD-INPE, explicitando a área e localização da bacia hidrográfica, a resolução do modelo digital de elevação (MDE), a quantidade de estações meteorológicas e pluviométricas utilizadas, o período de calibração e validação do modelo e a aplicação desses trabalhos. A escolha do MHD-INPE no presente estudo ocorreu mediante ao estudo realizado por Melo (2020) na Bacia Hidrográfica do Ribeirão Lavrinha (BHRL), a qual possui uma área de drenagem inferior (6,7 km²) a da BHRJ (33 km²), corroborando a possibilidade de aplica-lo em uma bacia de pequeno porte.

Tabela 1 - Aplicações utilizando o modelo MHD-INPE em diferentes bacias hidrográficas.

Pesquisa	Bacia hidrográfica	MDE/MDT (resolução)	Área	Medições da precipitação	Período	Aplicação do estudo
Falck et al. (2015)	Bacia Hidrográfica do Rio Tocantins-Araguaia	MDE - 90 metros de resolução espacial	764.000 km ²	300 estações pluviométricas	Calibração (2000-2008) e Validação (2010-2011)	Avaliar a incerteza nas estimativas de precipitação por satélite e se estas podem ser utilizadas como dados de entrada no MHD-INPE.
Siqueira Júnior, Tomasella e Rodriguez (2015)	Bacia Hidrográfica do Rio Madeira	MDE - 90 metros de resolução espacial	1.420.000 km ²	4391 estações pluviométricas	Calibração e Validação (1970-1990)	Impacto das mudanças climáticas e das mudanças no uso e ocupação do solo.
Mohor et al. (2015)	Bacia Hidrográfica do Rio Tapajós	MDE - 90 metros de resolução espacial	493.000 km ²	11 estações meteorológicas	Calibração (1970-1990) e Validação (2003-2008)	Impacto das projeções climáticas na bacia e na geração de energia da UHE de Rio Pires.
Silva et al. (2015)	Bacia Hidrográfica do Rio Purus	MDE - 90 metros de resolução espacial	Bacia Hidrográfica subdividida em 11 sub-bacias com áreas variando entre 7.020 a 366.000 km ²	Sete estações meteorológicas	Calibração (1970-1990)	Estimativa da umidade do solo
Rodriguez e Tomasella (2016)	Bacia Hidrográfica Ji-Paraná	MDE - 90 metros de resolução espacial	33.000 km ²	14 estações pluviométricas	Calibração (1996-2005) e Validação (1984-1995)	Analisar a capacidade do MHD-INPE de simular os impactos no uso e na mudança da cobertura do solo
Casagrande et al. (2017)	Bacia Hidrográfica do Rio Itajaí-Açu	MDE - 90 metros de resolução espacial	15.500 km ²	68 estações pluviométricas e uma estação meteorológica	Calibração (1971-2009) e Validação (2010-2014)	Alerta de cheias precoces
Tomasella et al. (2018)	Bacia Hidrográfica do Rio Doce	MDE - 90 metros de resolução espacial	83.400 km ²	262 estações pluviométricas, sendo 86 dentro da bacia, e 24 estações meteorológicas	Calibração (2000-2009) e Validação (2009-2013)	Avaliar a probabilidade de ocorrer inundações no período de 2001-2013.
Von Randow et al. 2019	Bacia Hidrográfica do Rio Tocantins	MDE - 90 metros de resolução espacial	960.000 km ²	Nove estações de medição.	Calibração (1970-1990) e Validação (1970-1990)	Impactos das mudanças climáticas e das mudanças no uso e ocupação do solo na vazão e na geração de energia na bacia.
Melo (2020)	Bacia Hidrográfica do Ribeirão Lavrinha	MDT - 30 metros de resolução espacial	6,7 km ²	Uma estação meteorológica.	Calibração (2006-2008) e Validação (2008-2010)	Atuação do MHD-INPE na microescala e em relação ao modelo DHSVM.

Fonte: Da autora (2020).

2.3. Modelos climáticos

Dentre os inúmeros avanços científicos ocorridos nos últimos anos, destaca-se a habilidade em simular sistemas físicos de alta complexidade com o auxílio de modelos numéricos que são constituídos por representações matemáticas que se aproximam da realidade (SAMPAIO et al., 2014).

Os modelos climáticos possibilitam a previsão das condições do tempo para dias consecutivos e também possuem a habilidade de projetar o clima na próxima estação ou simular características gerais do clima futuro, para décadas ou séculos, levando em consideração as modificações antropogênicas, como o aumento de emissão de gases de efeito estufa, aerossóis e as mudanças no uso e ocupação do solo. Além disso, incluem as interações mútuas da atmosfera com a hidrosfera, a criosfera, a biosfera e com a emissão de gases de forma natural ou antropogênica. O sistema de equações de um modelo climático é discretizado por meio de quatro dimensões, sendo elas: latitude, longitude, altitude (“pontos de grade”) e tempo (SAMPAIO et al., 2014).

Os modelos climáticos se subdividem em modelos climáticos globais (MCGs), que possuem resolução espacial horizontal de centenas de quilômetros, não sendo capazes de resolver fenômenos atmosféricos em escalas menores, como fenômenos de mesoescala e locais; e modelos climáticos regionais (MCRs), que possuem um domínio limitado e resolução espacial na ordem de dezenas de quilômetros, permitindo enxergar e resolver características do sistema terrestre não elencadas nos MCGs, tais como: topografia, vegetação heterogênea, dentre outros (SALES et al., 2015).

Diversos MCGs foram disponibilizados no *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5* (CMIP5), entretanto, neste trabalho, foram utilizados apenas três deles: HadGEM2-ES, MIROC5 e CanESM2 (Tabela 2). Esses modelos foram avaliados e selecionados, dentre os mais de 40 modelos climáticos disponibilizados pelo CMIP5, por apresentarem melhor desempenho para simular o clima da América do Sul (CHOU et al., 2014a; CHOU et al., 2014b; LYRA et al., 2018). Além disso, ressalta-se a facilidade de acesso as projeções do CPTEC/INPE e o fato destes modelos terem sido aplicados anteriormente em estudos envolvendo mudanças climáticas (ALVARENGA et al., 2018; AMORIM; CHAFFE, 2019; GU et al., 2018).

Tabela 2 - Detalhamento dos modelos climáticos globais.

Abreviação	Nome do modelo	Período de simulação		Referências
		Clima presente	Projeções	
HadGEM2-ES	<i>Hadley Centre Global Environmental Model 2-Earth System</i>	1950 - 2005	2006 - 2300	Collins et al. (2011), Jones et al. (2011)
MIROC5	<i>Model for Interdisciplinary Research on Climate</i>	1950 - 2005	2006 - 2100	Watanabe et al. (2010)
CanESM2	<i>Canadian Earth System Model version 2</i>	1850 - 2005	2006 - 2100	Arora et al. (2011), Chylek et al. (2011)

Fonte: Adaptado de Siqueira Júnior, Tomasella e Rodriguez (2015).

A sensibilidade da hidrologia em escala regional às condições climáticas variáveis faz com que as projeções de mudanças climáticas sejam essenciais para avaliar variações futuras no ciclo hidrológico (TEUTSCHBEIN; SEIBERT, 2012). A forma mais comum para estimar os impactos de mudanças climáticas na hidrologia envolve variáveis meteorológicas (por exemplo, temperatura, precipitação, umidade relativa do ar etc.) de modelos climáticos globais (MCGs) combinadas com modelos hidrológicos. No entanto, para estudos que visam avaliar o impacto regional, a resolução grosseira dos MCGs (100 - 250 km) é inadequada, pois faltam informações detalhadas na representação da topografia e uso e ocupação do solo, por exemplo (TEUTSCHBEIN; SEIBERT, 2012).

Neste contexto, o progresso nos modelos climáticos regionais (MCRs) tornou mais atraente o uso de simulações provenientes destes como base para estudos hidrológicos (TEUTSCHBEIN; SEIBERT, 2012). A regionalização (*downscaling*) dos resultados advindos de MCGs por meio de MCRs de alta resolução sobre a área de interesse é a técnica mais viável para escalonar as variáveis de baixa resolução espacial dos modelos globais para escalas locais mais refinadas. Esta técnica é utilizada tanto para previsão numérica de tempo, quanto para projeção numérica de clima. Nela os modelos regionais adotam como condições de contorno nas laterais do domínio geográfico os dados provenientes dos modelos climáticos globais (OLIVEIRA et al.; 2017; SAMPAIO et al., 2014).

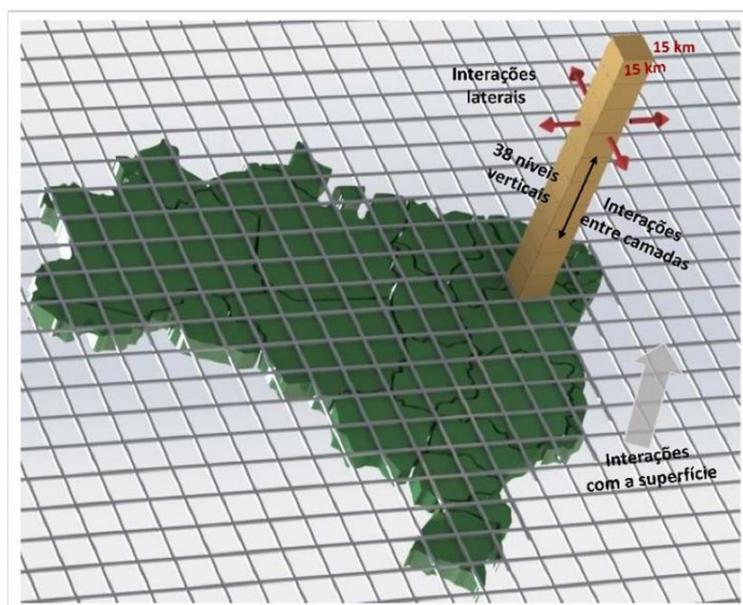
2.4. O modelo climático regional Eta

O modelo Eta foi desenvolvido na Universidade de Belgrado e no Instituto de Hidrometeorologia da Iugoslávia, sendo, posteriormente, operacionalizado pelo *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP). No Brasil, o modelo Eta foi instalado no CPTEC para previsões de curto prazo desde 1996 (MESINGER et al., 2012), para previsões sazonais desde 2002 (CHOU et al., 2014a) e para auxiliar estudos relacionados a mudanças climáticas (CHOU et al., 2014b), tendo como domínio a América do Sul e América Central (MARTINS; TOMASELLA; DIAS, 2019).

Conforme elencado por Chou et al. (2014a), este modelo usa a coordenada vertical Eta, que fica aproximadamente horizontal em áreas montanhosas e se torna uma vantagem para estudos em regiões que possuem topografia íngreme. Além disso, o modelo foi montado com resolução de 20 km e 38 níveis verticais, de modo que a parte superior é ajustada em 25 hPa.

O modelo Eta representa o estado atmosférico por meio da discretização em pontos de grade (Figura 1). As variáveis prognósticas do modelo são: temperatura do ar, umidade, pressão à superfície, vento horizontal, energia cinética turbulenta, precipitação, dentre outras, previstas (MARTINS; TOMASELLA; DIAS 2019).

Figura 1 - Esquema da discretização em pontos de grade do modelo climático regional Eta.



Fonte: Martins, Tomasella e Dias (2019).

2.5. Cenários Representativos de Concentração

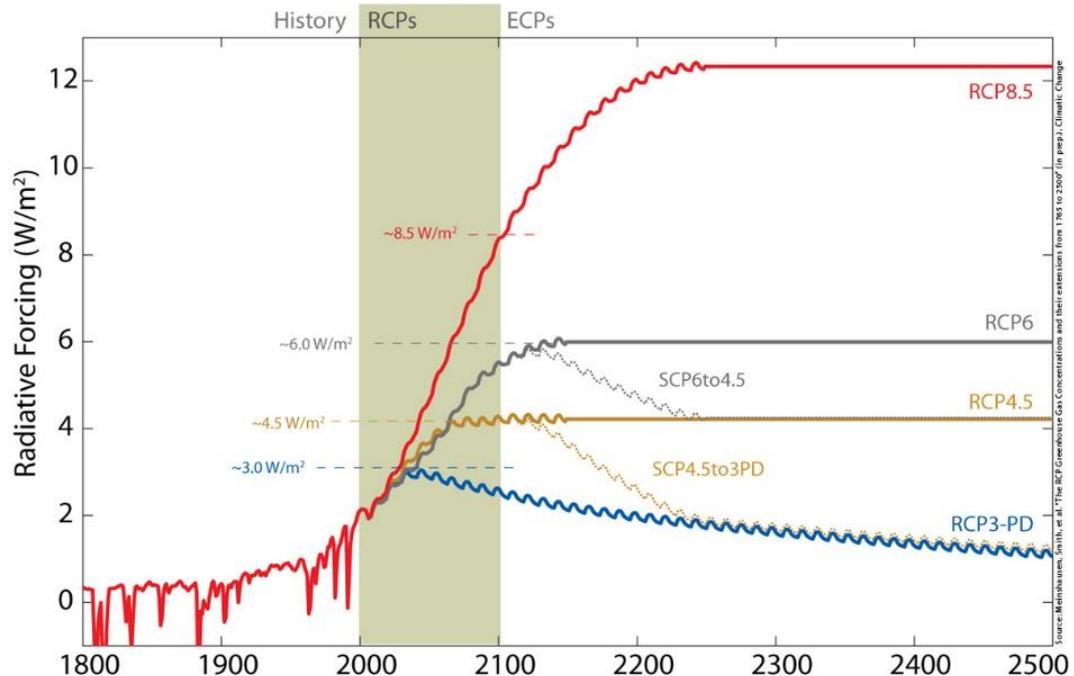
No Quarto Relatório de Avaliação (AR4) (IPCC, 2007), os cenários de emissões foram construídos com base em acontecimentos históricos, que foram agrupados em um desenvolvimento mais voltado para a economia ou um desenvolvimento mais sustentável, considerando um mundo mais globalizado ou em desenvolvimento regional (CHOU et al., 2014b).

Já o Quinto Relatório de Avaliação (AR5) (IPCC, 2013) forneceu projeções climáticas para quatro cenários ou quatro forçantes radiativas antropogênicas totais até o final do século XXI, denominados *Representative Concentration Pathways* (RCP) (em português, Caminhos Representativos de Concentração): RCP3-PD, RCP4.5, RCP6 e RCP8.5. O forçamento radiativo, expresso em $W m^{-2}$, é a mudança no fluxo líquido de radiação na tropopausa devido a uma alteração na concentração de gases de efeito estufa. Uma vez que a estrutura troposférica é determinada em grande parte por convecção, descobriu-se que a alteração na temperatura da superfície é diretamente proporcional ao forçamento radiativo (BYRNE; GOLDBLATT, 2013).

Estes cenários foram utilizados para as simulações com modelos climáticos realizadas no *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5* (CMIP5). Os cenários incluem séries temporais de emissões e concentrações do conjunto completo de gases de efeito estufa, aerossóis e gases quimicamente ativos, bem como uso e ocupação do solo para cada um destes. A palavra *representative* significa que cada RCP fornece apenas um dos muitos cenários possíveis que levariam a características específicas de forçamento radiativo. O termo *pathways* enfatiza que não só os níveis de concentração a longo prazo são de interesse, mas também a trajetória levada ao longo do tempo para alcançar esse resultado (IPCC, 2013; SANTOS et al., 2019).

A Figura 2 explicita os diferentes forçamentos radiativos do AR5 ao longo do século. O RCP4.5 corresponde aproximadamente ao cenário B1 no AR4, de modo que o forçamento radiativo aumenta quase linearmente até por volta de 2060 e depois diminui a taxa de aumento até o final do século XXI, onde este estabiliza. Já o RCP8.5 corresponde aproximadamente ao cenário A2 do AR4 e cresce quase linearmente durante o século XXI, mas com valores de forçagem radiativa mais altos (CHOU et al., 2014b).

Figura 2 - Forçamento Radiativo Antropogênico Global para o RCP4.5 e RCP8.5, conforme abordado no AR5 (IPCC, 2013).



2.6. Projeções climáticas com relatórios de avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC)

As pesquisas recentes sobre mudanças climáticas, baseadas no Quinto Relatório de Avaliação (AR5) do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), criaram informações interdisciplinares de fundamental importância para a população e comunidade científica. Projeções climáticas para a América do Sul foram feitas recentemente para detectar tendências importantes de chuva, temperatura, vazão de cursos d'água, extremos climáticos e nível do mar.

Chou et al. (2014a) avaliaram os impactos das mudanças climáticas sobre a América do Sul utilizando-se técnicas de regionalização (*downscaling*) com o modelo atmosférico Eta associado ao conjunto de três MCGs: HadGEM2-ES, BESM e MIROC5. A avaliação para o clima presente, que nesse caso é o período compreendido entre 1961 e 1990, mostrou que as simulações por meio do modelo Eta apresentam resultados satisfatórios quanto as características climatológicas gerais sobre a América do Sul quando comparado aos dados de clima observados disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Chou et al. (2014b) também avaliaram quatro simulações sobre a América do Sul até o fim do século XXI por meio do modelo Eta, novamente utilizando a técnica de regionalização

(*downscaling*) dos modelos climáticos HadGEM2-ES e MIROC5. Neste trabalho foram utilizados os cenários futuros RCP4.5 e RCP8.5. O modelo Eta-HadGEM2-ES mostrou maior sensibilidade quanto ao aumento dos gases do efeito estufa (GEE), o que implica que o mesmo apresentou mudanças climáticas futuras com maior impacto em relação ao Eta-MIROC5. Quanto às séries de temperatura, observou-se nas simulações com o Eta-HadGEM2-ES que às tendências de aquecimento são maiores, além de prever a diminuição da precipitação na região central do Brasil, enquanto o Eta-MIROC5 simula a expansão da área de aumento da precipitação do Sul para o Sudeste do Brasil.

Karlsson et al. (2016) avaliaram os efeitos combinados de modelos climáticos, modelos hidrológicos e cenários de uso e ocupação do solo nos impactos hidrológicos decorrentes das mudanças climáticas. Para tal análise, obtiveram respostas partindo-se de um cenário futuro (A1B) utilizando três modelos hidrológicos (NAM, SWAT e MIKE SHE) e quatro modelos climáticos regionalizados (ARPEGE–RM5.1, ECHAM5–HIRHAM5, ECHAM5–RCA3 e HadCM3–HadRM3), além de quatro cenários de uso e ocupação do solo. Este estudo foi realizado na bacia hidrográfica do rio Odense, localizado na região central da Dinamarca. As incertezas advindas dessas combinações foram avaliadas e os autores destacam ainda que as maiores incertezas nas simulações geradas advêm de modelos hidrológicos acoplados a modelos climáticos regionais que não foram calibrados para a região de estudo.

Lyra et al. (2017) foram pioneiros no uso de um modelo climático regional de alta resolução para forçar um modelo de vegetação dinâmico a fim de conhecer os impactos das mudanças climáticas nas Florestas Tropicais da América Central. Por meio da técnica *downscaling*, utilizaram o modelo Eta-HadGEM2-ES, com resolução horizontal de 5 km, tendo como propósito encontrar as possíveis modificações no referente bioma, utilizando-se dois cenários futuros: RCP4.5 e RCP8.5. Dentre os principais resultados obtidos pelos autores, ressalta-se a possibilidade do bioma Floresta Tropical não ser capaz de se adaptar as alterações sofridas pela temperatura e pela precipitação no futuro, o que resultaria numa possível morte da floresta e em sérias implicações para o ciclo global do carbono. Além disso, a América Central é altamente dependente dos recursos hídricos e a perda de floresta pode causar impactos regionais e locais na qualidade e disponibilidade hídrica.

Oliveira et al. (2017) avaliaram os impactos das mudanças climáticas na hidrologia e no potencial hidroelétrico da região de cabeceiras do Alto Rio Grande, em Minas Gerais. Para isto, utilizaram o modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) para calibrar e validar, mensalmente, a vazão de três usinas hidrelétricas (UHE): Camargos, Itutinga e Funil. Além

disso, projeções dos RCPs 4.5 e 8.5 dos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5 foram utilizados para simular o comportamento hidrológico da bacia e analisar os possíveis impactos sobre o potencial hidrelétrico dessas usinas. As projeções do Eta-HadGEM2-ES mostraram grandes reduções da vazão média mensal para todo o futuro (2006-2099), tanto no RCP4.5 quanto no RCP8.5, impactando negativamente o escoamento superficial e mostrando alta vulnerabilidade da região em relação aos usos da água no futuro. Já as projeções do Eta-MIROC5 variaram o comportamento entre os RCPs e as usinas hidrelétricas estudadas, mostrando maiores reduções na vazão média mensal da UHE de Camargos para o período de 2071-2099, sob o RCP4.5.

Alvarenga et al. (2018) avaliaram os impactos das mudanças climáticas no regime hidrológico de uma bacia na região de cabeceira do Rio Grande, região sudeste do Brasil. A análise das possíveis mudanças na vazão média sazonal e do balanço de água mensal foram realizadas partindo-se do modelo hidrológico *Distributed Hydrology Soil Vegetation Model* (DHSVM). A avaliação dos impactos das mudanças climáticas na hidrologia da bacia foi feita com as projeções dos cenários RCP4.5 e RCP8.5 do Eta-HadGEM2-ES. Dentre os principais resultados obtidos, destaca-se a redução da vazão sazonal durante todos os períodos simulados, sob as condições de ambos os RCPS, quando comparados ao clima presente (1961-1990). Houve, ainda, uma redução da vazão no verão de 80,35% no período de 2011-2040 e 74,24% no período de 2071-2099, sob o RCP4.5 e o RCP8.5, respectivamente.

Lyra et al. (2018) compararam as projeções de mudanças climáticas do modelo climático regional Eta, para a resolução horizontal de 20 km e de 5 km, na região Sudeste do Brasil, com ênfase em três regiões metropolitanas: Rio de Janeiro, São Paulo e Santos. As projeções futuras conduzidas pelo HadGEM2-ES foram para os cenários RCP4.5 e RCP8.5, até o final do século XXI. Por meio das projeções de mudanças climáticas foi observado um intenso aquecimento durante o verão na parte noroeste da região. A variação máxima de temperatura projetada sob RCP8.5 aproximou-se de 4 °C acima do normal no período de 2011-2040 e alcançou aproximadamente 8 °C acima do normal no último período (2071-2100). Além disso, os resultados da avaliação das projeções para período histórico (1961-1990) em comparação aos dados observados no mesmo período mostraram que a temperatura e a precipitação para Rio de Janeiro, São Paulo e Santos está melhor representado pelo Eta 5 km do que pelo Eta 20 km.

Santos et al. (2019) utilizaram os modelos Eta-MIROC5 e Eta-HadGEM2-ES como entrada para avaliar o desempenho do modelo hidrológico *Soil and Water Assessment Tool*

(SWAT) na bacia do Rio Paraguaçu, localizada na região semiárida do Brasil. Neste estudo, os autores avaliaram os impactos de mudanças climáticas na vazão média da bacia sob as condições das forçantes radiativas RCP4.5 e RCP8.5 $W m^{-2}$ para o período de 2020-2040. Os autores observaram um impacto de redução da vazão média em relação ao clima presente (1989-2009) de 82% no mês de dezembro, sob as condições do cenário RCP4.5 e de 90% no mês de março, sob o cenário RCP8.5, para o Eta-HadGEM2-ES. De modo geral, as projeções climáticas para o clima futuro (2020-2040) mostraram reduções expressivas da vazão média mensal em ambos os cenários, impactando negativamente a vazão e ressaltando a vulnerabilidade da região em relação ao abastecimento de água no futuro.

Dereczynski et al. (2020) apresentaram uma visão geral do desempenho do modelo Eta/CPTEC, avaliando a tendência nas simulações de índices climáticos extremos da temperatura e da precipitação na América do Sul. Neste trabalho, o clima presente corresponde ao período de 1965-2005. O modelo Eta foi aninhado a três MCGs: HadGEM2-ES, MIROC5 e CanESM2. Quanto aos resultados, os autores observaram que os índices climáticos advindos das simulações da temperatura foram similares aos índices provenientes dos dados observados. Além disso, as mudanças da temperatura simuladas pelo Eta-CanESM2 mostram tendências de magnitudes maiores, enquanto o Eta-MIROC5 mostra tendências de magnitudes menores. Os índices climáticos avaliados para as simulações da precipitação não mostraram um bom ajuste quando comparados aos índices das observações, o que os autores justificam como dificuldade dos modelos climáticos em reproduzir chuvas intensas devido à baixa escala utilizada (20 km).

3. METODOLOGIA

3.1. Caracterização da área de estudo

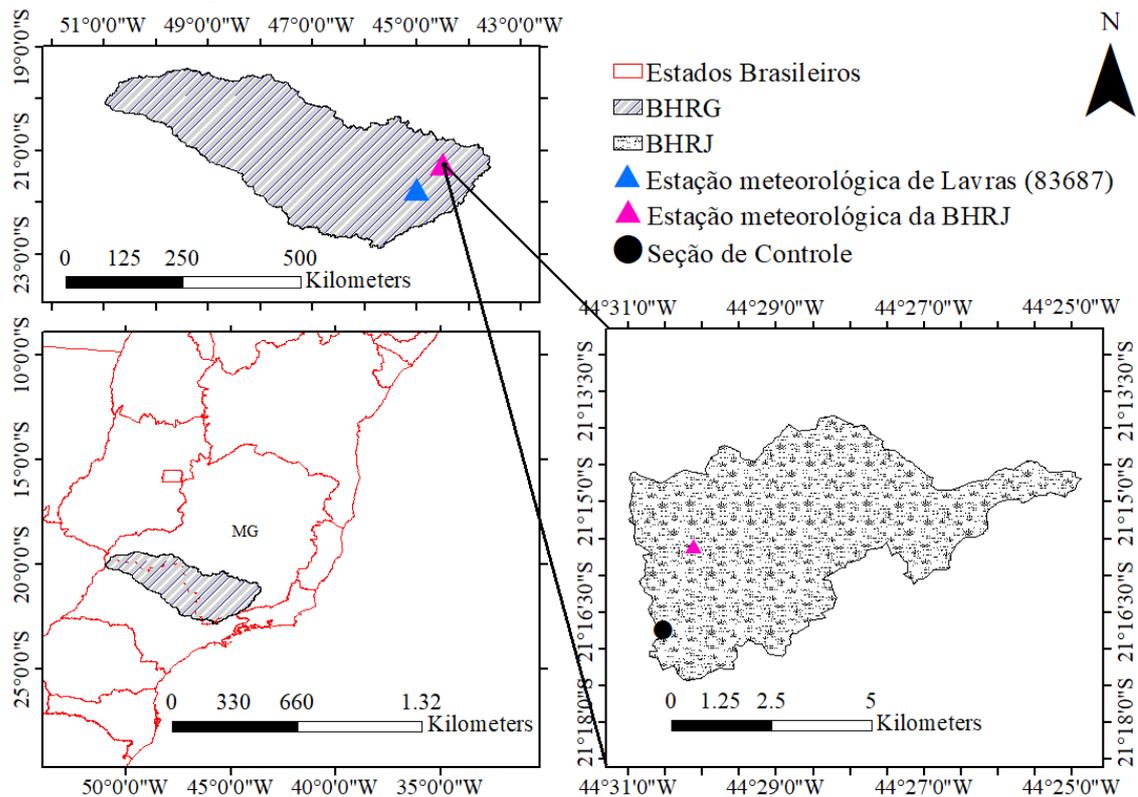
A Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jaguara (BHRJ), localizada entre as coordenadas geográficas $-44^{\circ}24'54''$ e $-44^{\circ}31'01''$ de longitude Oeste e $-21^{\circ}13'47''$ e $-21^{\circ}17'24''$ de latitude Sul, faz parte da unidade geomorfológica do Planalto Campos das Vertentes, na Região do Alto Rio Grande e Unidade de Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos GD1, no estado de Minas Gerais, a sudeste do Brasil (Figura 3).

A bacia possui uma área de drenagem de 33 km^2 e deságua diretamente no reservatório da Usina Hidrelétrica de Camargos (UHE), pertencente a Companhia Energética de Minas

Gerais (CEMIG). Estudos como o de Alves et al. (2019), Andrade, Mello e Beskow (2012) e Beskow et al. (2011a, b) destacam que o comportamento dessa bacia é relevante na compreensão da dinâmica do ciclo hidrológico e no auxílio à tomada de decisões na referente região, no que diz respeito ao uso, conservação e preservação da qualidade dos recursos naturais, visto que há um avançado estágio de degradação destes.

A BHRJ é uma bacia representativa do bioma Mata Atlântica, que segundo a Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO), é uma das mais importantes reservas da biosfera do planeta devido suas espécies endêmicas e relevância hidrológica (MELLO et al., 2019; UNESCO, 2020). Originalmente, o bioma ocupava mais de 1,3 milhões de km² em 17 estados do território nacional, porém, devido à ocupação e atividades humanas na região, hoje resta cerca de 29% de sua cobertura original, segundo dados do Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2015).

Figura 3 - Localização da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jaguará (BHRJ) no alto da Bacia Hidrográfica do Rio Grande (BHRG) no estado de Minas Gerais.



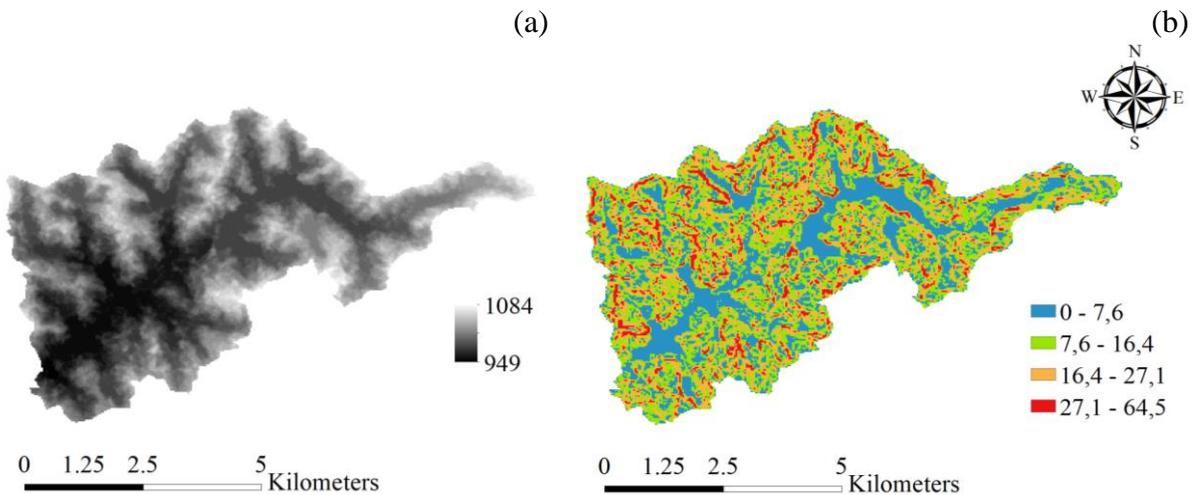
Fonte: Adaptado de IBGE (2019).

O clima na BHRJ, conforme a classificação Köppen, é do tipo Cwa e caracteriza-se por verões quentes e úmidos e invernos frios e secos. A temperatura e precipitação média

anual são de 19 °C e 1500 mm, respectivamente (ALVES et al., 2019; ANDRADE; MELLO; BESKOW, 2012; MELLO et al. 2012).

No que diz respeito ao uso e ocupação do solo, Alves et al. (2019) identificaram na BHRJ os seguintes usos: pastagem (38,5%); culturas anuais, principalmente milho (*Zea mays L.*) e trigo (*Triticum aestivum L.*) (30,9%); floresta nativa (15,1%); eucalipto (*Eucalyptus globulus*) (10,3%); solo nu (4,9%); e área urbana (0,3%). Quanto as classes de solos, Alves et al. (2019) apontaram a predominância de Latossolos (53,6%). Também é possível encontrar em porcentagens menores Cambissolo háplico distrófico típico (19,3%) e Neossolo flúvico (27,1%). A variação de altitude está entre 949 e 1084 metros (Figura 4a), sendo a elevação média da bacia de 998 metros. A declividade média da bacia é de 13% (Figura 4b).

Figura 4 - Modelo digital de elevação (a) e mapa da declividade (b) da BHRJ.



Fonte: Da autora (2020).

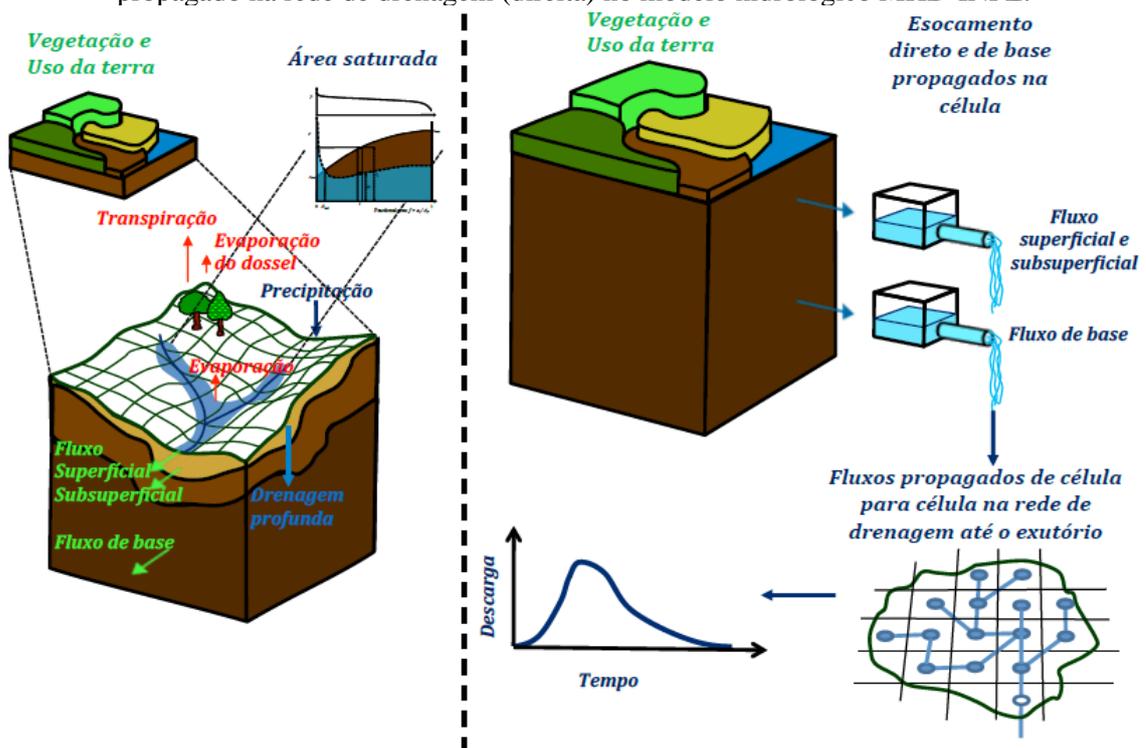
3.2. O Modelo Hidrológico Distribuído (MHD-INPE)

O Modelo Hidrológico Distribuído de grande escala (MHD-INPE) foi desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) a partir do Modelo de Grandes Bacias do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (MGB-IPH), o qual recebeu modificações nas rotinas para estimativa da evaporação e da separação de fluxos (FALCK et al., 2015).

A estruturação do MHD-INPE é composta por quatro módulos (balanço de água no solo; evapotranspiração; escoamento superficial, subsuperficial e subterrâneo; escoamento da rede de drenagem) os quais estão explicitados na Figura 5. A obtenção da resposta se dá por meio da simulação hidrológica, que na versão atual do modelo utiliza três camadas, sendo elas: uma superior, uma intermediária e uma inferior (Figura 6).

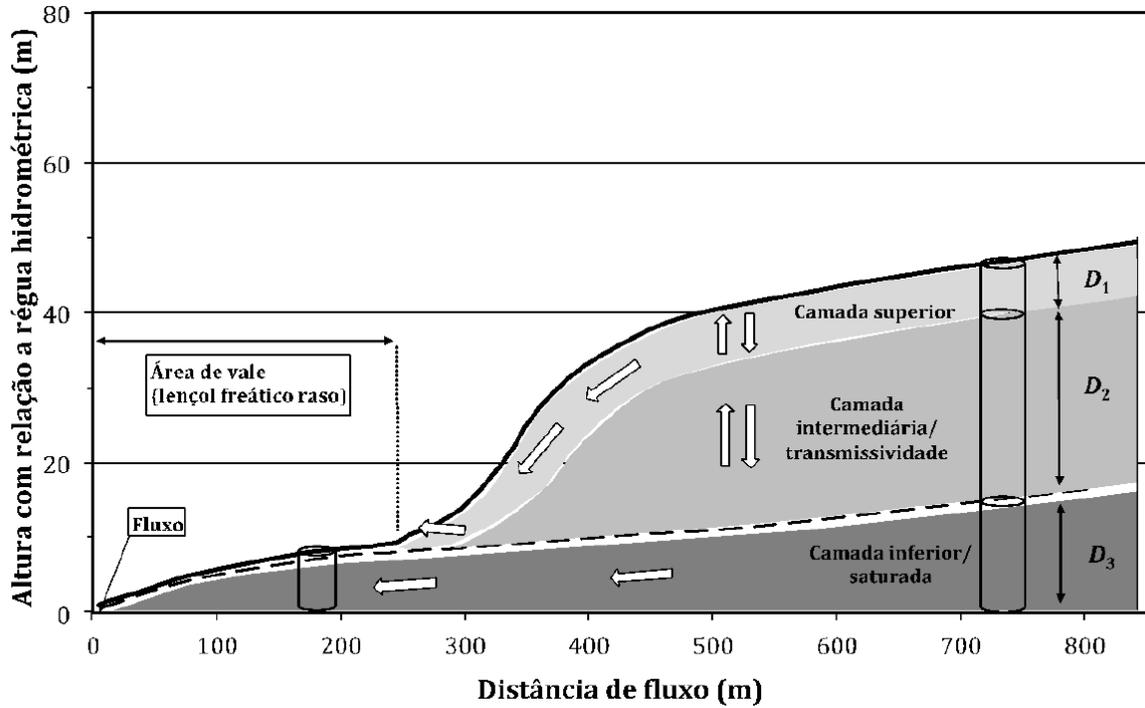
A camada superior é responsável pelo fluxo subsuperficial e drena para a camada intermediária, que por sua vez direciona o fluxo vertical para a camada inferior. A camada intermediária atua como uma espécie de reservatório de água para vegetação que possui raízes excessivamente profundas, como ocorre em florestas e no cerrado e não permite fluxos horizontais, o que pode fazer com que esta desapareça em casos de solos muito rasos. Quanto a camada inferior, está é responsável por controlar o fluxo de base e, de maneira indireta, o fluxo superficial por excesso de saturação.

Figura 5 - Esquema ilustrativo das etapas de separação de escoamento (esquerda) e do fluxo propagado na rede de drenagem (direita) no modelo hidrológico MHD-INPE.



Fonte: Manual de implementação do MHD-INPE (2016).

Figura 6 - Esquema conceitual do modelo hidrológico MHD-INPE indicando os fluxos e sua direção e as diferentes camadas: superior, com espessura D_1 ; intermediária, com espessura D_2 ; e inferior, com espessura D_3 .



Fonte: Manual de implementação do MHD-INPE (2016).

A separação dos fluxos estimada pelo MHD-INPE combina a formulação do modelo *Xinjiang* (ZHAO, 1992; ZHAO et al., 1995) e do modelo *TopModel* (BEVEN; KIRKBY, 1979), visando abordar os processos de geração de escoamento. A estruturação do modelo presume que a superfície do lençol freático é paralela à superfície e considera uma variação não linear da transmissividade em relação a profundidade, conforme abordado pelos autores Beven e Kirkby (1979) e Iorgulescu e Musy (1997) em seus respectivos estudos. Considerando que o fluxo subterrâneo atinge o valor máximo quando o armazenamento de água no solo também é máximo, foi obtida a Equação 1 para a estimativa de fluxo de base da camada inferior (Q_{sub}):

$$Q_{sub} = \frac{T_{sub} \tan \beta}{\lambda_{\mu}^{\mu}} \left[1 - \frac{S_{max} - S_t}{S_{max}(1-\xi)} \right]^{\mu} = \frac{T_{sub} \tan \beta}{\lambda_{\mu}^{\mu}} \left[\frac{S_t - \xi S_{max}}{S_{max}(1-\xi)} \right]^{\mu} \quad (1)$$

onde T_{sub} é a transmissividade quando o lençol freático atinge a superfície; $\tan \beta$ é a declividade média do lençol freático na célula; S_{max} e S_t são, respectivamente, o valor máximo e o valor médio na célula no tempo t do armazenamento na camada inferior do solo; ξ a razão entre o armazenamento na capacidade de campo e S_{max} ; μ é um parâmetro que

determina a variação de transmissividade em relação a profundidade; e λ_μ é a média na grade da área de contribuição à montante por unidade de contorno. O armazenamento máximo Sm_{ax} é dado pelo produto da porosidade do solo ϕ e espessura média da camada saturada D_3 .

O valor médio da área de contribuição à montante por unidade de contorno, para um perfil de transmissividade de tipo potência, conforme abordado por Iorgulescu e Musy (1997), estima-se conforme a Equação 2:

$$\lambda_\mu = \frac{1}{A_t} \int_0^{A_t} \lambda_i^\mu da_c \quad (2)$$

em que λ é a contribuição à montante por unidade de contorno elevada à potência μ e A_t a área da célula. Por meio de um histograma da área de contribuição à montante da grade, torna-se possível em cada passo de tempo estimar a fração de área saturada A_{sat} e o fluxo superficial por saturação Q_{sof} .

A abordagem do retardo entre infiltração e recarga pelo modelo MHD-INPE considera que cada unidade de grade é coberta por uma camada superior de solo espacialmente uniforme. Presumindo condições de drenagem livre (gradiente unitário), o fluxo lateral na camada superior do solo é proporcional à área de montante. Integrando esta equação na área da célula, obtém-se a Equação 3:

$$Q_{ss} = \frac{\alpha D_1 K_{ss} \tan \beta}{\lambda_n^\eta} \left(\frac{SS_t}{SS_{max}} \right)^\eta \quad (3)$$

onde K_{ss} a condutividade hidráulica da camada superior do solo; D_1 a espessura da camada superior do solo; α o coeficiente que considera a anisotropia do solo; η é o parâmetro de condutividade proposto por Brooks e Corey (1964); SS_{max} é a capacidade máxima de armazenamento da camada superior do solo igual ao produto de D_1 e porosidade do solo; SS_t representa o armazenamento médio na célula no tempo t ; e λ_n é a área de contribuição média por unidade de contorno elevada à potência $1/\eta$. A diferença entre camada superior do solo e a camada intermediária menos o fluxo lateral, dado pela Equação 3, resulta na Equação 4, que consiste na estimativa de fluxo entre as duas camadas.

$$Q_v = \frac{K_{ss} \lambda}{\lambda_\mu^\mu} \left(\frac{SS_t}{SS_{max}} \right)^\eta \left(1 - \frac{\alpha D_1}{\lambda} \right) \quad (4)$$

$$\lambda_\eta = \frac{1}{A_t} \int_0^{A_t} \lambda_i^\eta da_c \quad (5)$$

onde λ representa a contribuição à montante por unidade de contorno elevada à potência η e A_t a área da célula. Para considerar o retardo adicional devido à recarga do aquífero de grande

espessura e nos casos onde o sistema radicular é fundamental na manutenção de evaporação na estação seca, incluiu-se a camada intermediária. A camada intermediária recebe a drenagem profunda Q_v da camada superior do solo e contribui para a recarga do aquífero Q_r , conforme Equação 6:

$$Q_r = K_{ss} \left(\frac{SR_t}{SR_{max}} \right)^\eta \quad (6)$$

em que SR_t é o armazenamento médio na grade da camada intermediária no tempo t e SR_{max} representa a capacidade máxima de armazenamento na camada intermediária, igual ao produto da espessura da camada D2 e a porosidade do solo.

As equações de fluxo superficial (S_{ub}) e o subsuperficial (Q_{ss}) geram taxas instantâneas, porém ambas não consideram o roteamento interno da célula. Desta forma, a atenuação desses fluxos usa reservatórios lineares similares aos usados no modelo MGB-IPH, resultando em dois parâmetros adicionais: C_{sup} que é o retardo devido aos fluxos superficial e subsuperficial e C_{sub} que é roteamento interno da célula do fluxo de base (Q_{sub}).

O procedimento de calibração do MHD-INPE é baseado no algoritmo do método de otimização *Shuffled Complex Evolution* (SCE-UA), o qual foi desenvolvido na Universidade do Arizona, conforme metodologia descrita por Duan et al. (1992). A Tabela 3 apresenta a descrição dos parâmetros que foram calibrados no modelo MHD-INPE e suas respectivas unidades e intervalos de variação.

Tabela 3 - Descrição dos parâmetros calibráveis do Modelo Hidrológico Distribuído (MHD-INPE), contendo suas respectivas unidades e intervalos de variação.

Parâmetro	Unidade	Intervalo	Descrição
D_1	m	0-2	Espessura da camada superior
D_2	m	0-30	Espessura da camada intermediária
D_3	m	0-100	Espessura da camada inferior
K_{ss}	m dia ⁻¹	0,001-36	Multiplicador da condutividade hidráulica saturada
α	-	1-10000	Coefficiente de anisotropia
T_{sub}	m ² dia ⁻¹	0,01-100	Transmissividade máxima na camada inferior do solo
ξ	-	0-1	Razão do armazenamento na capacidade de campo e S_{max} (valor máximo na célula no tempo t do armazenamento na camada inferior do solo)
μ	-	0,01-4	Parâmetro responsável por representar o retardamento da transmissividade em relação a espessura da zona saturada
C_{sub}	dia ⁻¹	0,01-100	Parâmetro de roteamento para o fluxo superficial e subsuperficial
C_{supe}	dia ⁻¹	0,001-100	Parâmetro de roteamento para o fluxo base

Fonte: Manual de aplicação do MHD-INPE (2016).

Segundo Falck et al. (2015), no MHD-INPE, as células da grade são subdivididas em unidades de resposta hidrológica (URH) advindas da combinação de usos e ocupações dos solos, tipos de solo e vegetação. O modelo determina o balanço hídrico em cada URH e gera o valor de fluxo médio ponderado pela área para cada célula de grade. Além disso, a simulação da perda de água por interceptação ocorre por meio da metodologia proposta por Gash et al. (1995). A extração radicular profunda de captura da água da vegetação desde o solo é resolvida conforme o modelo de distribuição de raízes proposto por Jarvis (1989), de acordo com as estimativas de evaporação, obtidas por meio do método de *Penman-Monteith* (MONTEITH, 1981).

No MHD-INPE, conforme visto anteriormente, as sub-bacias são subdivididas em células regulares interligadas por canais que, nesse caso, representam a rede de drenagem. Dentro de cada célula propaga-se os fluxos de água para os canais de drenagem, por meio de reservatórios lineares simples (RLS). Deste modo, a troca do fluxo por meio desses canais entre as células é resolvida de acordo com o algoritmo *Muskingum-Cunge*, proposto por Cunge (1969), assim como foi implementado no modelo MGB-IPH (FALCK et al., 2015; RODRIGUEZ; TOMASELLA, 2016).

3.3. Dados de entrada e implementação do modelo hidrológico MHD-INPE

O modelo hidrológico MHD-INPE foi implementado para a BHRJ, de modo que a bacia foi delimitada em células regulares com resolução espacial de $0,01^\circ \times 0,01^\circ$. Para a delimitação da BHRJ, foi utilizado o modelo digital de elevação (MDE) da missão *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER), com resolução espacial de 30 metros, disponibilizado por meio da plataforma *Earth Explorer* do *United States of Geological Survey* (USGS).

A individualização da rede de drenagem utilizando o MDE da missão ASTER foi realizada por meio do software *TerraView*, com o auxílio da extensão *TerraHydro*, ambos disponibilizados pelo INPE. O *TerraHydro* inicialmente determina as direções da rede de drenagem com resolução máxima, que no caso será de 30 metros, e corrige inconsistências na altitude a fim de eliminar depressões. No passo seguinte, obteve-se um plano de informação, o qual é chamado direção de local de drenagem (LDD) onde cada célula na resolução de 30 metros será codificada por um número inteiro que relata a direção preferencial do escoamento, de modo que essa informação faz com que seja possível obter a rede de drenagem acumulada.

Na etapa subsequente, a rede de drenagem de 30 metros foi agregada a uma resolução de $0,01^\circ$ usando a direção predominante. Em seguida, a mesma foi comparada e aproximada a rede de drenagem da bacia fornecida pela plataforma do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) <<https://www.ibge.gov.br/>>, a fim de efetuar eventuais correções no traçado obtido. Por meio do LDD e da rede de drenagem acumulada em alta resolução, foi possível obter o comprimento e a declividade dos trechos de rio em cada célula com resolução $0,01^\circ$, de acordo com a metodologia abordada por Paz e Collischonn (2007).

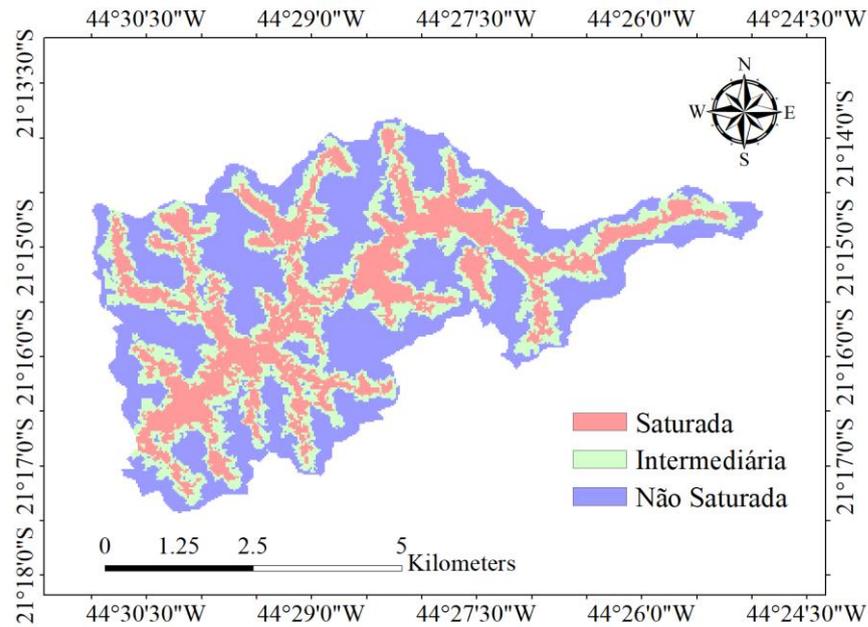
O modelo utiliza como entrada para a calibração dados de velocidade do vento, umidade relativa do ar, temperatura, pressão à superfície, radiação solar global e precipitação. Para isso, foi utilizada no período de 2006-2014 a série de dados meteorológicos diários da estação meteorológica localizada na BHRJ. A série de dados observados diários de vazão também foi utilizada para a análise de desempenho do modelo. Esta última foi obtida por meio de um linígrafo presente na seção de controle da BHRJ (Figura 1).

Os dados de solo foram extraídos do mapa de relevo obtido pelo modelo normalizado de terrenos *Height Above the Nearest Drainage* (HAND), o qual possui uma versão implementada na extensão *TerraHydro*, conforme metodologia abordada por Rennó et al. (2008). Assim como observado por Cuartas et al. (2012), o modelo HAND foi utilizado

devido a indisponibilidade de mapas de solos detalhados para bacias de pequeno porte, como é o caso da BHRJ.

O modelo *HAND* mensura a diferença altimétrica entre os pontos de grade do modelo digital de elevação (MDE) do terreno e seu respectivo ponto de escoamento na drenagem mais próxima, considerando o caminho superficial de fluxo (*flowpath*), que liga por meio da topografia os pontos da superfície com a rede de drenagem. Isso resulta em uma grade que representa a normalização do MDE em relação à drenagem da bacia. Desta forma, todos os pontos ao longo da rede de drenagem possuem cota zero, por serem pontos que são considerados referência final de altura. Estes pontos relacionam-se diretamente com o potencial gravitacional de drenagem de cada ponto do MDE. Portanto, os pontos podem ser agrupados em zonas potenciais constantes, de modo que seja possível verificar sua relevância hidrológica e ecológica (ALVARENGA et al., 2018; CUARTAS et al., 2012;).

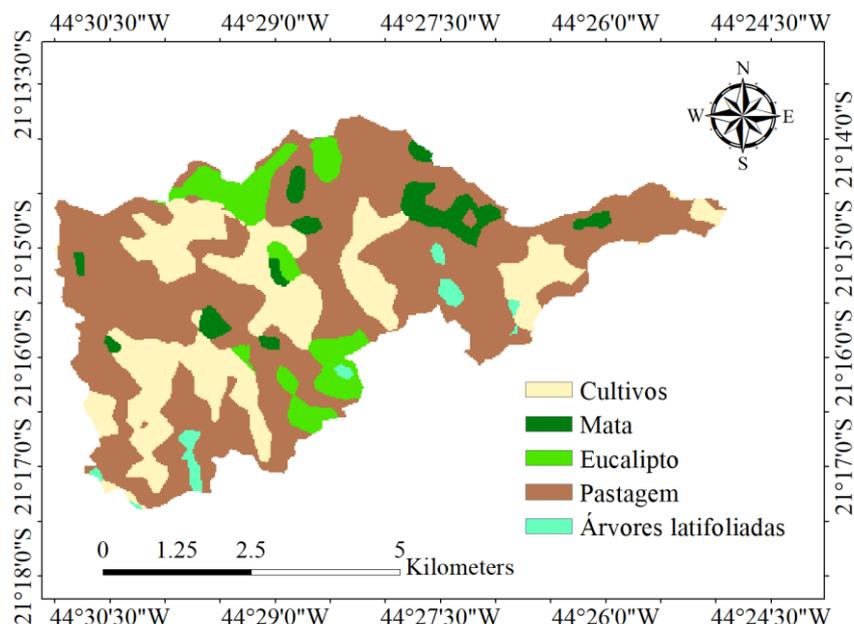
A reclassificação do mapa obtido por meio modelo *HAND* (Figura 7) foi realizada no *software ArcGis* 10.5. Desse modo, foram delimitadas três classificações para o relevo, as quais foram subdivididas em áreas saturadas, intermediárias e não-saturadas. Na primeira classe, encontram-se os pontos do modelo que possuem de zero a cinco metros de altura em relação a rede de drenagem mais próxima – pontos estes correspondentes a vales, onde o lençol freático está mais próximo da superfície do solo (áreas saturadas). Na segunda classe, encontram-se os pontos que possuem de cinco a 20 metros de altura em relação a rede de drenagem mais próxima – tais pontos correspondem a encostas (áreas intermediárias). A terceira classe são aquelas onde os pontos possuem de 20 a 100 metros de altura em relação a rede de drenagem mais próxima – pontos que representam topo de morros (áreas não-saturadas).

Figura 7 - Delimitação do relevo da BHRJ obtido por meio do modelo *HAND*.

Fonte: Da autora (2020).

Os dados de uso e ocupação do solo foram extraídos das imagens fornecidas pela plataforma de pesquisa que disponibiliza dados *raster* e vetoriais produzidos pelo Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento (LAPIG), da Universidade Federal de Goiás (UFG), com resolução espacial de 250 metros. A delimitação do mapa de uso e ocupação do solo também foi feita por meio do *software ArcGis 10.5* (Figura 8).

Figura 8 - Mapa de uso e ocupação do solo da BHRJ implementado no modelo MHD-INPE.



Fonte: Adaptado de Lapig (2019).

O mapa de relevo obtido pelo modelo *HAND* e o de uso e ocupação do solo foram agregados para a obtenção dos grupos da terra no MHD-INPE. Cada célula do modelo hidrológico considera as porcentagens de cada grupo de uso do solo contido dentro dessa célula. Ambos os mapas foram utilizados para definir o percentual de cada combinação de textura do solo, por meio do triângulo textural USDA, e do uso da terra em cada célula da grade de resolução de 0,01° (FALCK et al., 2015).

3.4. Calibração, validação e análise de desempenho do MHD-INPE

O aquecimento do modelo para homogeneização dos dados de entrada foi de 01 de janeiro a 31 de março de 2006. A calibração do modelo foi feita automaticamente, sendo o período de calibração de 01 de outubro de 2006 a 30 de setembro de 2012. O período de validação foi de 01 de outubro de 2012 a 30 de setembro de 2014.

Em seguida, gerou-se e analisou-se as hidrógrafas diárias, com a finalidade de mostrar o ajuste da vazão simulada pelo modelo hidrológico em comparação a vazão observada na bacia hidrográfica. Também foram verificadas a evapotranspiração estimada pelo MHD-INPE e a evapotranspiração observada na BHRJ, as quais foram obtidas por meio de balanço hídrico vertical gerado a partir de dados diários de precipitação e deflúvio.

A análise do desempenho do modelo hidrológico MHD-INPE foi feita por meio do índice de eficiência Nash-Sutcliffe (NSE) (NASH; SUTCLIFFE, 1970) (Equação 7), índice de eficiência Nash-Sutcliffe do logaritmo das vazões (LNSE) (Equação 8), coeficiente de determinação (R^2) (Equação 9) e porcentagem bias (PBIAS) (YAPO et al., 1996) (Equação 10).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{si})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - \overline{Qo})^2} \quad (7)$$

$$LNSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\log(Q_{oi}) - \log(Q_{si}))^2}{\sum_{i=1}^n (\log(Q_{oi}) - \log(\overline{Qo}))^2} \quad (8)$$

$$R^2 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - \overline{Qo}) (Q_{si} - \overline{Qs})}{\sum_{i=1}^n [(Q_{oi} - \overline{Qo})^2]^{0,5} [(Q_{si} - \overline{Qs})^2]^{0,5}} \right\}^2 \quad (9)$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{si} - \sum_{i=1}^n Q_{oi}}{\sum_{i=1}^n Q_{oi}} * 100 \quad (10)$$

em que Q_{si} é a vazão simulada no tempo i ; Q_{oi} é a vazão observada no tempo i , \overline{Qo} é a vazão observada média, \overline{Qs} é a vazão simulada média e n é o número total de dados observados.

O NSE e LNSE apresentam valor máximo igual a um, assim como o R^2 . O NSE determina a habilidade do modelo em reproduzir a série de vazões observadas e possui uma forte influência das vazões máximas, enquanto o LNSE é mais sensível as vazões mínimas. Já o R^2 informa sobre o grau de correlação entre os valores estimados e observados, além de relatar a habilidade do modelo em reproduzir a forma e a distribuição do hidrograma (FALCK et al., 2015; GUPTA et al., 2009; RODRIGUEZ; TOMASELLA., 2016).

A porcentagem bias (PBIAS) avalia a tendência que a média dos valores simulados pelo modelo tem em relação aos observados na bacia hidrográfica. O valor ideal do PBIAS é 0, portanto, valores positivos mostram a superestimação do modelo e valores negativos a subestimação (BRIGHENTI et al., 2016; YAPO et al., 1996).

De modo geral, a performance do modelo hidrológico pode ser classificada conforme a Tabela 4, proposta por Moriasi et al. (2015).

Tabela 4 - Classificação dos índices estatísticos para avaliação do desempenho de modelos hidrológicos.

Índices Estatísticos	Intervalo de variação	Critério de desempenho			
		Muito Bom	Bom	Satisfatório	Não satisfatório
NSE e LNSE	$-\infty$ a 1	$> 0,80$	0,70 a 0,80	0,50 a 0,70	$\leq 0,50$
R^2	0 a 1	$> 0,85$	0,75 a 0,85	0,60 a 0,75	$< 0,60$
PBIAS	$-\infty$ a 100	$< \pm 5\%$	± 5 a $\pm 10\%$	± 10 a $\pm 15\%$	$> \pm 15\%$

Fonte: Adaptado de Moriasi et al. (2015).

Além disso, analisou-se a curva de permanência da vazão observada na BHRJ em relação vazão estimada pelo MHD-INPE no passo de tempo diário e, por meio desta, as vazões de referência Q5% e Q90%.

3.5. Projeções das mudanças climáticas

As projeções climáticas diárias utilizadas no presente estudo foram produzidas pelo modelo Eta, descrito no item 2.3.1, o qual consegue cobrir a maior parte da América do Sul e dos oceanos adjacentes a esse continente. Essas projeções foram escolhidas devido a disponibilidade dos dados e, também, para atender o objetivo de avaliar os impactos das mudanças climáticas na região de estudo.

Conforme destacado por Chou et al. (2014a), os processos convectivos ocorrem conforme o esquema de Betts-Miller (JANJIC, 1994) e o processo de precipitação é resolvido pelo esquema de Zhao (ZHAO; CARR, 1997). O modelo também conta com simulações de radiação de onda curta (LACIS; HANSEN, 1974) e onda longa (FELS; SCHWARZKOPF, 1975). As condições de contorno lateral são extraídas do Modelo de Circulação Global do CPTEC (BONATTI, 1996; CAVALCANTI et al., 2002) e os processos de superfície são representados pelo modelo Noah (EK et al., 2003).

Foram consideradas previsões de três modelos e dois cenários do Quinto Relatório de Avaliação (AR5) do IPCC: os MCGs HadGEM2-ES, MIROC5 e CanESM2 e os cenários RCP4.5 e RCP8.5. O RCP4.5, que é intermediário e representa um aquecimento global médio para o final do século XXI variando entre 1,1 e 2,6 °C e o RCP8.5 que representa o cenário mais pessimista e resulta num aquecimento médio variando entre 2,6 e 4,8 °C (SANTOS et al., 2019).

As projeções referem-se ao clima presente (1961-2005) e ao clima futuro (2006-2099) e foram extraídas na Plataforma de Projeções de Mudança do Clima para a América do Sul

regionalizadas pelo modelo Eta (PROJETA), do CPTEC, para o ponto de grade referente a localização da estação meteorológica da BHRJ.

3.6. Correção das projeções de mudanças climáticas do modelo ETA

Erros sistemáticos, comumente chamados de viés, são esperados das saídas de projeções de mudanças climáticas, uma vez que os processos atmosféricos que ocorrem nos modelos climáticos diferenciam-se daqueles que acontecem na atmosfera terrestre. Dentre os principais erros sistemáticos dos modelos climáticos regionais, elenca-se a ocorrência de muitos dias de precipitação de baixa intensidade e estimativa incorreta de temperaturas extremas, além da subestimação, superestimação e variações sazonais incorretas da precipitação (MARTINS; TOMASELLA; DIAS, 2019). Portanto, o uso de saídas de modelos climáticos regionais não corrigidas como entradas em modelos hidrológicos conduzirá a uma avaliação não realista dos impactos hidrológicos (MARTINS; TOMASELLA; DIAS, 2019; TEUTSCHBEIN; SEIBERT, 2012).

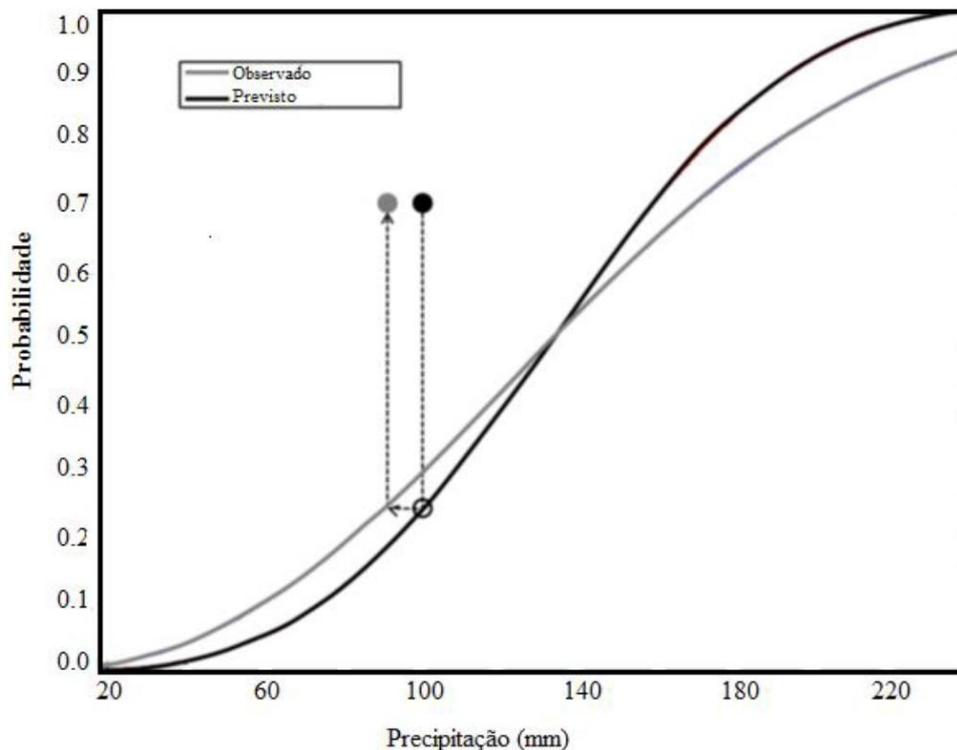
Existem diversas técnicas de correção para extinguir erros sistemáticos. No presente estudo, utilizou-se a abordagem percentil por percentil, proposta por Bárdossy e Pegram (2011), para corrigir erros sistemáticos em cada uma das variáveis meteorológicas requeridas pelo modelo MHD-INPE (velocidade do vento, umidade relativa do ar, temperatura, pressão à superfície, radiação solar global e precipitação).

Na técnica proposta por Bárdossy e Pegram (2011) são geradas funções de probabilidade cumulativas (FDPs) para cada variável meteorológica que será corrigida para o ponto de grade em questão e para todo o período de observação. Esse método assume que os erros sistemáticos são determinados pelo deslocamento das funções de distribuição de probabilidade para o mesmo nível de frequência experimental (MARTINS; TOMASELLA; DIAS, 2019). Portanto, para cada valor de grade das diferentes variáveis meteorológicas para o período de 1961-2005 produzido pelo modelo, foi determinada a probabilidade associada a esse valor usando a função de distribuição de frequência empírica. Para o mesmo nível de probabilidade, o valor corrigido de cada variável foi determinado por meio da função de distribuição empírica extraída dos dados observados em grade (SIQUEIRA JÚNIOR; TOMASELLA; RODRIGUEZ, 2015).

Conforme descrito por Martins, Tomasella e Dias (2019) e Bardóssy e Pegram (2011), a Figura 9 ilustra um exemplo do procedimento de correção de erros sistemáticos da precipitação. A linha preta contínua representa as probabilidades de não excedência das

precipitações projetada pelo modelo Eta para 2006-2040. Já a linha cinza contínua representa as probabilidades de não excedência associadas às precipitações para o período de controle (1961-2005). Por exemplo, tem-se para um determinado mês uma precipitação prevista para o período de avaliação (2006-2040) de 100 mm, com probabilidade de excedência de 0,7 (círculo sólido preto). Posteriormente, obtém-se a probabilidade referente à mesma precipitação na função ajustada aos dados observados no período de controle (1961-2005) (círculo vazio preto). Em seguida, obtém-se para esta última probabilidade o valor de precipitação correspondente na função ajustada aos dados observados no mesmo período (1961-2005), fazendo com que esse valor de precipitação venha a ser adotado para a série corrigida do modelo. Por fim, esse valor de precipitação é adotado para a série corrigida do modelo Eta (período de avaliação), como ilustrado pelo círculo sólido cinza. Dessa forma, é possível constatar que o ano de avaliação (2006-2040) foi retirado do período de controle (1961-2005) e assim se repete para os demais anos a serem avaliados e corrigidos.

Figura 9 - Esquema de representação da correção bias do modelo Eta para a precipitação.



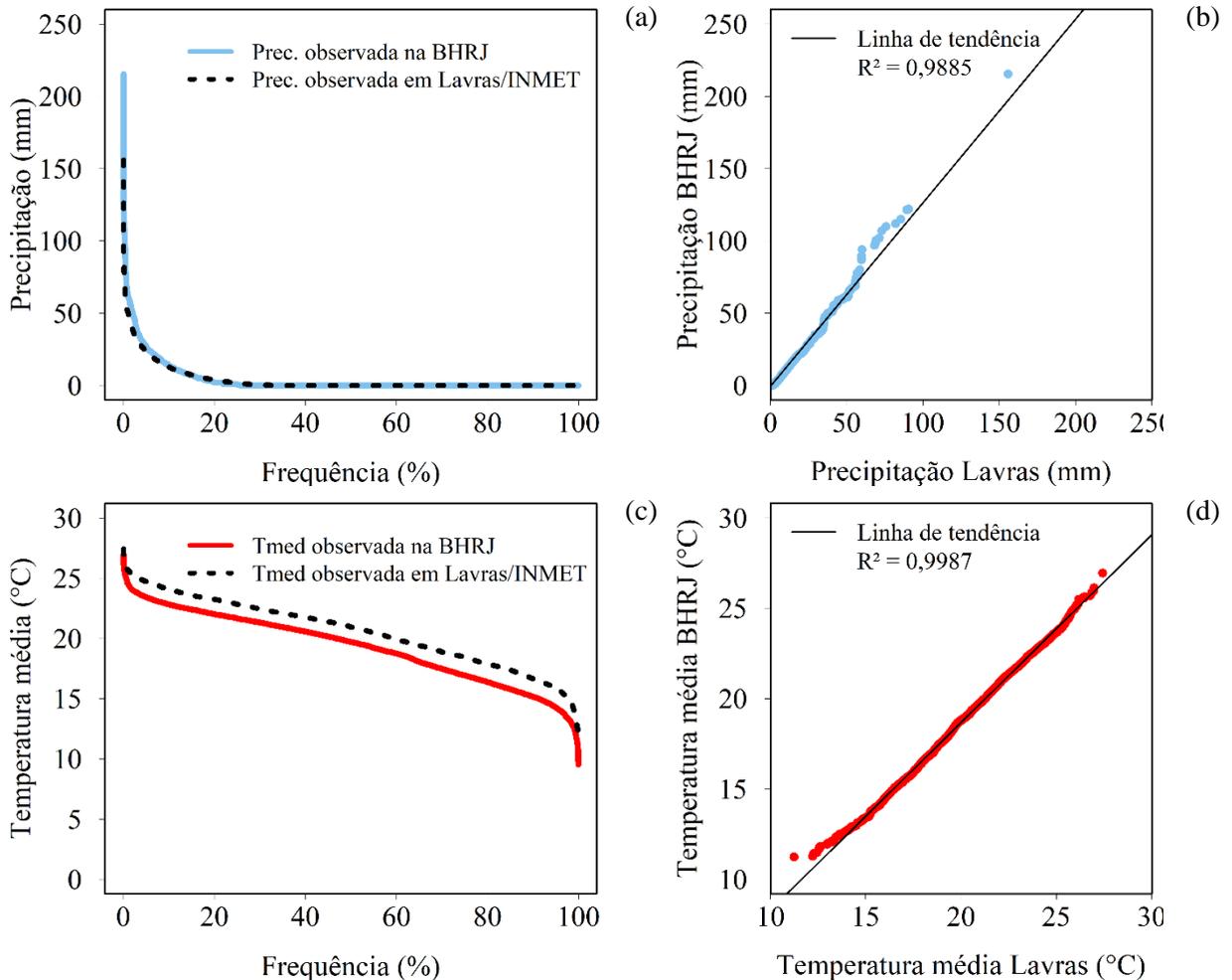
Fonte: Martins, Tomasella e Dias (2019).

Todas as variáveis meteorológicas requeridas pelo MHD-INPE foram corrigidas, tanto para o clima presente (1961-2005) quanto para o clima futuro (2006-2099), utilizando-se a

série histórica de dados meteorológicos observados de Lavras (código 83687), extraída do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) do INMET.

A utilização da série histórica de dados observados de Lavras foi necessária devido a série de dados advinda da estação meteorológica da BHRJ apresentar dados somente de 2006 a 2014. Portanto, a série não possui dados para equiparação com o período histórico dos modelos climáticos regionais, que vai de 1961 a 2005. A comparação foi realizada entre as séries de precipitação e temperatura média de ambas as estações. Contudo, sabe-se que a precipitação é a variável que apresenta maior variabilidade espacial. A análise foi feita por meio da distribuição da frequência de excedência para o período de 2006 a 2014, conforme as Figuras 10a e 10c. Tal comparação possibilitou observar a semelhança no regime de chuvas entre as duas estações, o que também pode ser verificado pelas curvas de dispersão de ambas as variáveis (Figura 10b e 10d), as quais possuem um coeficiente de determinação próximo ao valor máximo (um).

Figura 10 - Distribuição da frequência de excedência da precipitação (Prec) e da temperatura média (Tmed) da estação meteorológica de Lavras/INMET e da estação meteorológica da BHRJ (a e c), no período de 2006-2014. A verificação de homogeneidade da precipitação total e da temperatura média de ambas as estações (b e d), para o mesmo período, também foi apresentada.



Fonte: Da autora (2020).

As projeções climáticas corrigidas dos modelos Eta-HadGEM2-ES, Eta-MIROC5 e Eta-CanESM2 foram avaliadas mensalmente, analisando a distribuição destas no clima presente (1961-2005) e a variabilidade percentual do clima futuro (2006-2040, 2041-2070 e 2071-2099), sob as condições dos RCPs 4.5 e 8.5, em relação ao clima presente. Além disso, as projeções foram avaliadas sazonalmente, por meio da abordagem do conjunto de multimodelos (*multimodel ensemble*), que se baseia na afirmação de que nenhum modelo tem desempenho melhor que outro (AMORIM; CHAFFE, 2019b) e permite verificar a dispersão nas projeções de mudanças climáticas.

3.7. Análise estatística de extremos e avaliação dos impactos de mudanças climáticas

Depois de calibrar e validar o MHD-INPE na escala diária, foram utilizados como entrada os dados meteorológicos diários corrigidos advindos dos modelos Eta-HadGEM2-ES, Eta-CanESM2 e Eta-MIROC5. O modelo hidrológico foi executado para o clima presente (1961-2005) e para as projeções (2006-2099), sob cenários RCP4.5 e RCP8.5. Mediante a um acordo feito entre os especialistas do IPCC, os RCPs fornecem pontos de partida comuns (2006), a partir dos quais pesquisadores podem trabalhar em paralelo na geração de novos cenários de mudanças climáticas integrados. Os cenários foram subdivididos em períodos de 30 anos (2006-2040, 2041-2070, 2071-2099), com a finalidade de avaliar o impacto das mudanças no clima na vazão futura da BHRJ ao longo do século XXI.

Após a simulação das vazões no modelo MHD-INPE utilizando as projeções do modelo Eta como entrada, analisou-se a curva de permanência dessas vazões, com ênfase para as vazões com 5, 20, 70, 80 e 95% de permanência. Além disso, também foi realizada a análise estatística de extremos, conforme a metodologia descrita por Ley et al. (2011), a qual está diretamente relacionada a curva de permanência das vazões simuladas para a BHRJ. A Tabela 5 explicita os descritores estatísticos utilizados no presente estudo, assim como o significado e sua respectiva equação.

Tabela 5 - Descritores estatísticos utilizados na vazão simulada pelo MHD-INPE.

Descritor	Descrição	Equação
SEASON	Diferença entre as vazões dos períodos sazonais de cheia (verão) e seca (inverno).	$SEASON = \frac{\text{médiaCheia} - \text{médiaSeca}}{\text{média}}$
Q_{SM}	Declividade da curva de permanência nas vazões intermediárias. Indica a variabilidade média dos coeficientes de vazão.	$Q_{SM} = \frac{\text{quantil}0,8 - \text{quantil}0,2}{\text{média}}$
MWH	Segmentos de vazões máximas que indica a resposta hidrológica para altos índices pluviométricos.	$MWH = \frac{\sum_{h=1}^H Q_h}{H}$ h = 1, 2, ...H vazões com probabilidade de excedência < 0,05.
MWL	Segmentos de vazões mínimas que indica a resposta hidrológica para baixos índices pluviométricos.	$MWL = \frac{\sum_{l=1}^L Q_l}{L}$ l = 1, 2, ...L vazões com probabilidade de excedência > 0,95.

Fonte: Adaptado de Ley et al. (2011), Siqueira Júnior, Tomasella e Rodriguez (2015) e Lopes et al. (2017).

Na etapa subsequente, avaliou-se as vazões simuladas por meio das projeções dos modelos Eta-HadGEM2-ES, Eta-MIROC5 e Eta-CanESM2 mensalmente no clima presente (1961-2005) e no clima futuro (2006-2040, 2041-2070 e 2071-2099), mediante os cenários RCP4.5 e RCP8.5. As vazões simuladas também foram avaliadas sazonalmente por meio da abordagem do conjunto de multi-modelos (*multimodel ensemble*).

Em seguida, aplicou-se o método de Budyko (1974), também conhecido como curva de Budyko, o qual relaciona o índice de aridez (ϕ) à proporção que a evapotranspiração representa da precipitação. Por meio de uma relação física simples, a razão entre a evapotranspiração real (ET_R) e a precipitação (PREC) pode ser determinada por meio da relação entre evapotranspiração potencial (ET_P) e a precipitação. O balanço hídrico (Equação 11) na bacia hidrográfica é descrito da seguinte maneira (OLIVEIRA; TOMASELLA; SANCHES, 2019):

$$PREC = ET_R + Q + \frac{\Delta S}{\Delta t} \quad (11)$$

onde $PREC$ é a precipitação, ET_R é a evapotranspiração real, Q é a vazão e $\Delta S/\Delta t$ é a variação do armazenamento de água na bacia hidrográfica ao longo do tempo.

No método de Budyko, os fatores climáticos precipitação ($PREC$) e evapotranspiração potencial (ET_P) são os principais reguladores do balanço hídrico, assumindo a escala média anual (SILVA et al., 2017). Entretanto, ainda na escala de tempo anual, é possível afirmar que o armazenamento de água nas bacias hidrográficas varia tanto pelas mudanças climáticas quanto pelo efeito advindo da combinação de fatores climáticos e antropogênicos. Conseqüentemente, as mudanças na curva de Budyko são atribuídas às mudanças climáticas e ao efeito de fatores climáticos combinados a fatores antropogênicos, em consequência das influências antrópicas na bacia (OLIVEIRA; TOMASELLA; SANCHES, 2019).

Considerando longos períodos de tempo (> 10 anos), a variação do armazenamento de água ($\Delta S/\Delta t$) no balanço hídrico não é significativa e, portanto, a média anual da evapotranspiração real (ET_R) pode ser obtida por meio da diferença entre a precipitação ($PREC$) e a vazão (Q), ambas em mm (Equação 12). A fração da precipitação ($PREC$) na evapotranspiração real (ET_R) e na vazão (Q) é dada pelo índice de evaporação (ε) (Equação 13):

$$ET_R = PREC - Q \quad (12)$$

$$\varepsilon = [\phi \cdot \tanh(\phi^{-1}) \cdot (1 - \exp(-\phi))]^{0.5} \quad (13)$$

onde ϕ (índice de aridez) é a razão entre a evapotranspiração potencial média (ET_P) e a precipitação média ($PREC$).

No presente estudo, o índice ϕ e ε foram calculados para o clima presente (1961-2005) e clima futuro (2006-2040, 2041-2070 e 2071-2099), sob os cenários RCP4.5 e RCP8.5 dos modelos climáticos Eta-HadGEM2-ES, Eta-MIROC5 e Eta-CanESM2. Por meio da relação entre os índices, conclui-se que dois fatores podem estar limitando a evapotranspiração na bacia: o fornecimento de água, quando $\phi > 1$ e o fornecimento de energia, quando $\phi < 1$ (OLIVEIRA; TOMASELLA; SANCHES, 2019).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Calibração e aplicação do modelo hidrológico

O modelo hidrológico MHD-INPE foi calibrado e validado no passo de tempo diário. O passo de tempo diário foi adotado em decorrência da incompatibilidade das projeções climáticas horárias com a metodologia percentil por percentil adotada na correção de erros sistemáticos.

As Tabelas 6, 7 e 8 resumizam os parâmetros finais após a calibração, os parâmetros fixos obtidos do modelo *HAND* e os parâmetros fixos das classes de vegetação do MHD-INPE, respectivamente.

Tabela 6 - Parâmetros finais do modelo hidrológico MHD-INPE para a BHRJ no passo de tempo diário e suas respectivas amplitudes de calibração.

Parâmetros calibrados	Amplitude de calibração	Valores finais
		Passo de tempo diário
Profundidade da camada superior (m)	0,01 a 5	0,8888
Profundidade da camada intermediária (m)	0 a 10	0,1960
Profundidade da camada inferior (m)	5 a 10	7,8919
Multiplicador da condutividade hidráulica saturada	0,01 a 10	0,4847
Transmissividade horizontal (T_{sub}) ($m^2 d^{-1}$)	0,01 a 1000	1,4678
Decaimento da CHS com a profundidade	0,01 a 5	0,1072
Anisotropia do solo	1 a 10.000	927,2231
Mínimo de armazenamento subterrâneo (%)	0 a 2	0,0019
Tempo de retardo do escoamento superficial (s)	0,001 a 10	0,1314
Tempo de retardo do escoamento subterrâneo (s)	0,001 a 10	0,5010

Fonte: Da autora (2020).

Tabela 7 - Parâmetros fixos de solo modelo MHD-INPE.

Parâmetros de solo	Vales	Encostas	Topo de morros
Condutividade hidráulica saturada (CHS) ($m d^{-1}$)	12,2472	95,2519	50,9615
Pressão de entrada do ar (kPa)	3,1894	1,0221	1,0289
Coefficiente da curva de retenção de água no solo	4,5486	1,712	2,7455
Umidade volumétrica de saturação ($m^3 m^{-3}$)	0,5618	0,4501	0,5628
Umidade volumétrica residual ($m^3 m^{-3}$)	0,1579	0,1558	0,2348

Fonte: Da autora (2020).

Tabela 8 - Parâmetros fixos de vegetação do modelo MHD-INPE.

Parâmetros de vegetação	Árvores latifoliadas	Pastagem	Cultivos	Eucalipto	Mata
Ponderação de estresse	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Distribuição de raízes	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
Tipos funcionais de plantas	16	16	16	16	16
Albedo	0,130 a 0,170	0,157 a 0,203	0,125 a 0,156	0,140 a 0,175	0,182 a 0,199
Índice de área foliar ($m^2 m^{-2}$)	1,186 a 5,206	1,4 a 3,0	0,13 a 5,90	2,5	2,66 a 5,00
Altura (m)	18	0,3 a 0,6	0,145 a 0,520	22	18
Cobertura (%)	0,74 a 0,99	0,5 a 0,9	0,0 a 0,9	0,72	0,81
Profundidade radicular (m)	10,0	1,5	1,5	2,5	3,0
Plano de deslocamento zero (m)	13,445 a 14,597	0,219 a 0,325	0,01 a 0,30	14,52	8,28
Rugosidade (m)	0,728 a 0,972	0,045 a 0,078	0,011 a 0,040	2,706	1,8
Resistência superficial ($s m^{-1}$)	67	50	50	8 a 100	100
Capacidade máxima do dossel (mm)	0,85	0,50	0,80	0,42	0,54

Fonte: Da autora (2020).

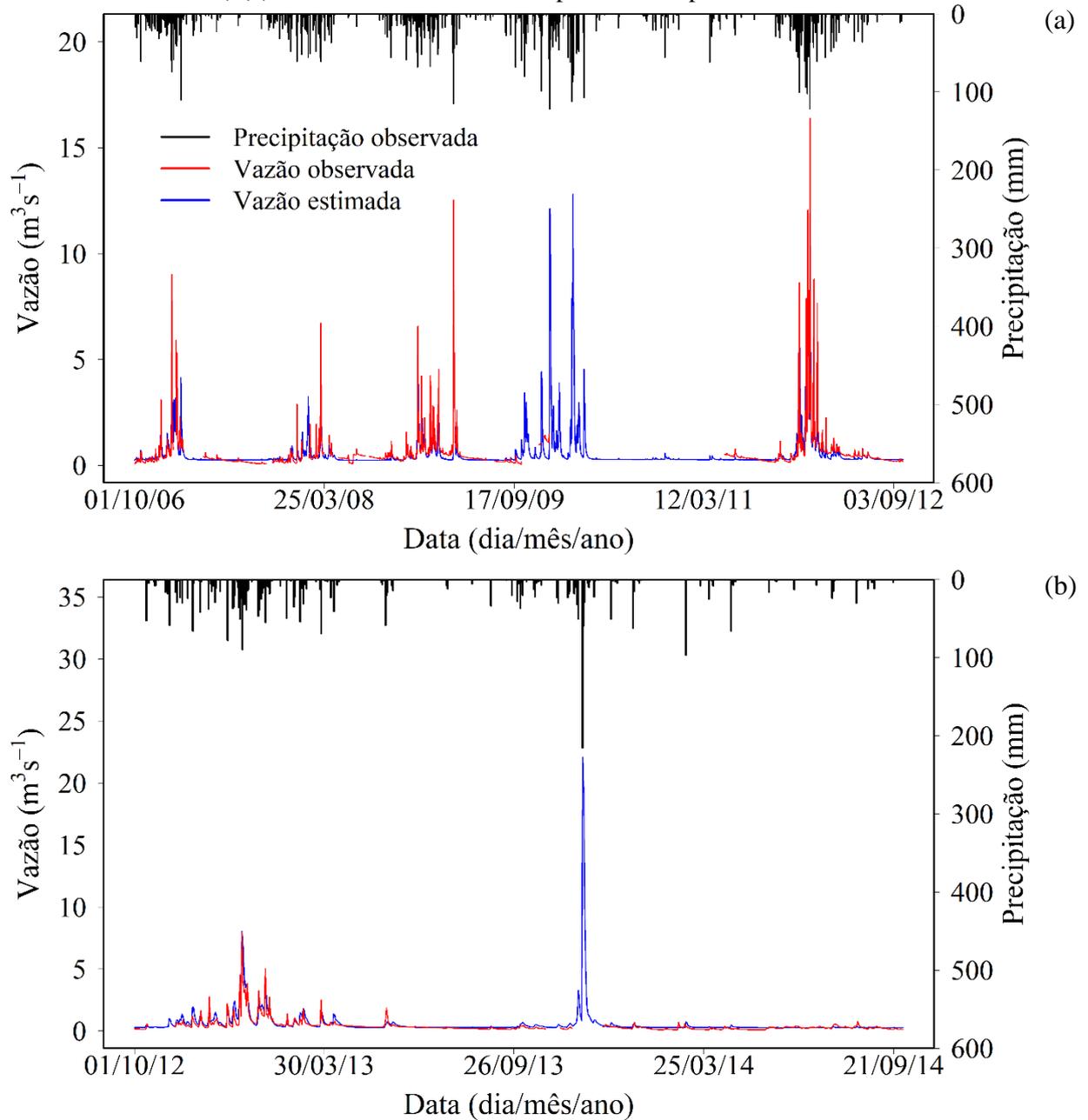
A Figura 11 mostra a vazão observada e a vazão simulada pelo MHD-INPE na BHRJ. As hidrógrafas foram subdivididas conforme os períodos (calibração e validação) para o passo de tempo diário.

Observou-se que o MHD-INPE simulou picos na vazão diária, sendo, $12,80 m^3 s^{-1}$ no dia 04 de março de 2010 para a calibração (Figura 11a) e $22,08 m^3 s^{-1}$ no dia 30 de novembro de 2013 para a validação (Figura 11b). No dia 09 de janeiro de 2012 ocorreu uma precipitação de 36,50 mm e a vazão observada de $16,40 m^3 s^{-1}$ na bacia. A vazão simulada pelo MHD-INPE nesse dia foi de $9,51 m^3 s^{-1}$, o que indicou a subestimação da vazão simulada pelo modelo. A vazão mínima simulada foi de $0,24 m^3 s^{-1}$ no dia 08 de agosto de 2008, quando foi observada uma vazão de $0,39 m^3 s^{-1}$ na bacia, indicando também subestimação do fluxo base.

É importante ressaltar a dificuldade do modelo em representar os picos de vazão, o que pode ser consequência da baixa disponibilidade de dados pluviométricos espacializados na área de estudo, bem como das limitações de dados de entrada para o modelo, conforme observado em estudos anteriores utilizando o MHD-INPE (FALCK et al., 2015; MELO, 2020; RODRIGUEZ; TOMASELLA, 2016). Além disso, percebeu-se, por meio das hidrógrafas, que o modelo mostrou dificuldade ao representar o decaimento da curva de recessão, simulando, assim, um volume menor nesses períodos quando comparada a série

observada, o que também foi observado por Neto et al. (2014) ao aplicar o modelo SWAT na BHRJ.

Figura 11 - Hidrógrafas para o período de calibração (out/2006 - set/2012) (a) e validação (out/2012 - set/2014) (b) do modelo MHD-INPE no passo de tempo diário.



Fonte: Da autora (2020).

As componentes do balanço hídrico vertical anual observado e estimado pelo modelo MHD-INPE podem ser visualizadas na Tabela 8. Vale ressaltar que foi considerado apenas o ano hidrológico de 2011-2012 para o cálculo do balanço hídrico vertical, pois este é o único ano do período de análise (2006-2014) que não possui falhas.

A relação entre a evapotranspiração e a precipitação anual (ET/P) obtida por meio do balanço hídrico ($ET = P - \text{Deflúvio}$) foi de 65% utilizando as simulações do MHD-INPE e 62% por meio das observações na BHRJ (Tabela 8). Valor aproximado foi encontrado por Pontes et al. (2016) em uma sub-bacia da BHRJ, a Bacia Hidrográfica do Ribeirão Marcela (BHRM), onde foi observado que a evapotranspiração é a componente com maior participação no balanço hídrico da bacia, representando 56,7% da precipitação. Desse modo, é possível observar que o modelo MHD-INPE mostrou resultados satisfatórios ao simular a evapotranspiração na BHRJ, corroborando os resultados obtidos na região deste estudo.

Tabela 8 - Componentes totais do balanço hídrico anual na BHRJ para o ano hidrológico 2011-2012.

Componentes do balanço hídrico anual	Observado	MHD-INPE
Precipitação (mm)	2185	2185
Deflúvio (mm)	823	760
ET (mm)	1362	1425
ET/P (%)	62	65

Fonte: Da autora (2020).

A Tabela 9 apresenta as estatísticas de precisão utilizadas para a análise de desempenho do modelo MHD-INPE na estimativa da vazão na BHRJ. As vazões médias diárias (observada e estimada pelo modelo) acumuladas para os períodos de calibração (2006-2012) e validação (2012-2014) podem ser visualizadas na Figura 12.

Os valores de NSE foram superiores a 0,700, tanto para a calibração quanto para a validação. Já os valores de LNSE foram inferiores a 0,700, o que implica uma maior dificuldade nas simulações das vazões mínimas, principalmente no passo de tempo diário. Isso pode ser resultado da dificuldade do modelo em representar a resposta hidrológica no passo de tempo diário em bacias de pequeno porte (CASAGRANDE et al., 2017; FALCK et al., 2015; SIQUEIRA JÚNIOR; TOMASELLA; RODRIGUEZ, 2015).

O PBIAS de -9,9% na calibração, apesar de satisfatório (MORIASI et al., 2015), indica subestimação da vazão nesse período (Figura 12a). Quanto ao período da validação, o PBIAS mostrou desempenho não satisfatório (MORIASI et al., 2015) ao superestimar a vazão da BHRJ, o que também ficou evidenciado na Figura 12b. O R^2 foi superior a 0,700 tanto na calibração quanto na validação. O desempenho do MHD-INPE foi, em geral, satisfatório, conforme a classificação dos índices estatísticos proposta por Moriasi et al. (2015), a qual foi descrita na Tabela 4.

Tabela 9 - Índices estatísticos obtidos para a calibração (out/2006 – set/2012) e validação (out/2012-set/2014) do modelo MHD - INPE no passo de tempo diário.

Período	NSE	LNSE	R²	PBIAS (%)
Calibração	0,742	0,622	0,748	-9,9
Validação	0,715	0,529	0,784	21,6

Fonte: Da autora (2020).

Diferentes resultados dos índices estatísticos Nash e Sutcliffe (NSE) e porcentagem bias (PBIAS) em outros estudos envolvendo o modelo MHD-INPE e a BHRJ podem ser visualizados na Tabela 10. É possível verificar que outros modelos apresentaram bom desempenho e foram passíveis de aplicação para simulação hidrológica na BHRJ, assim como o modelo MHD-INPE apresentou desempenho adequado quando aplicado em outra bacia hidrográfica de pequeno porte, resultados estes que corroboram os obtidos neste estudo.

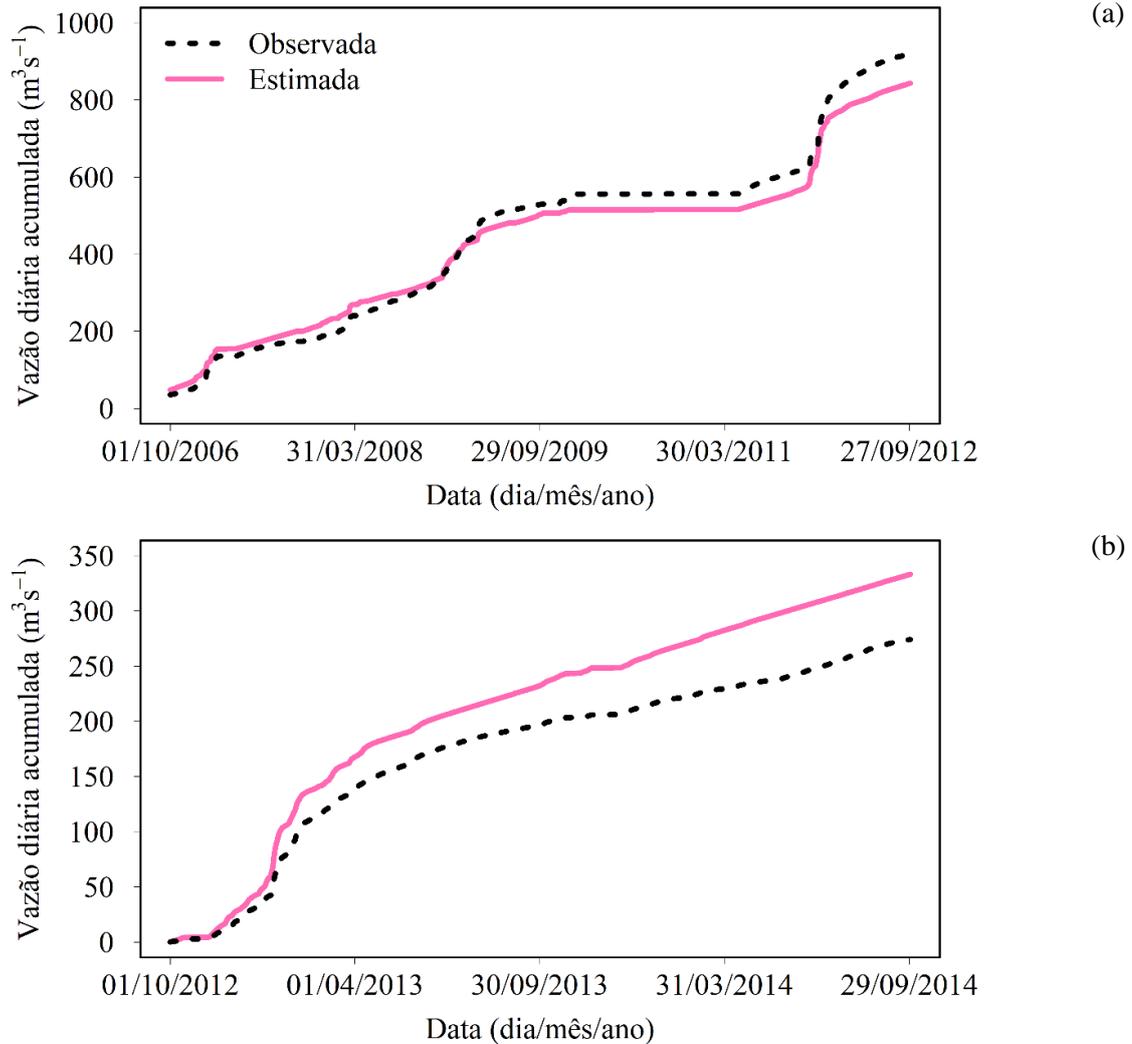
Vale mencionar, ainda, a excepcional seca que atingiu a região sudeste do Brasil no ano hidrológico de 2013-2014, o qual está incluso no período da validação (Figura 12b). Esse fenômeno climático fez com que o período da validação apresentasse condições muito diferentes do período da calibração (Figura 12a), situação esta que afeta o desempenho de qualquer modelo hidrológico.

Tabela 10 - Índices estatísticos Nash e Sutcliffe (NSE) e porcentagem bias (PBIAS) da calibração (C) e da validação (V) diária em trabalhos utilizando o MHD-INPE e na aplicação de modelos hidrológicos na BHRJ.

Referência	Bacia Hidrográfica/ Estado/Área	Modelo hidrológico	Período		NSE		PBIAS (%)	
			C	V	C	V	C	V
Beskow et al. (2011a)	Ribeirão Jaguara/ MG/ 33 km ²	LASH	2006-2007	2008-2009	0,82	0,76	-	-
Andrade, Mello e Beskow (2012)	Ribeirão Jaguara/ MG/ 33 km ²	SWAT	2006-2008	2008-2009	0,66	0,87	+4,33	-1,59
Neto et al. (2014)	Ribeirão Marcela/ MG/ 4,7 km ²	SWAT	2007-2009	2006-2007	0,54 a 0,71	0,46	-49,5 a +9,41	-7,73
Melo (2020)	Ribeirão Lavrinha/ MG/ 6,76 km ²	MHD-INPE	2006-2008	2008-2010	0,80	0,70	-8,0	+7,74
Zakhia (2020)	Ribeirão Jaguara/ MG/ 33 km ²	MHD-INPE	2006-2012	2012-2014	0,74	0,72	-9,9	+21,6

Fonte: Da autora (2020).

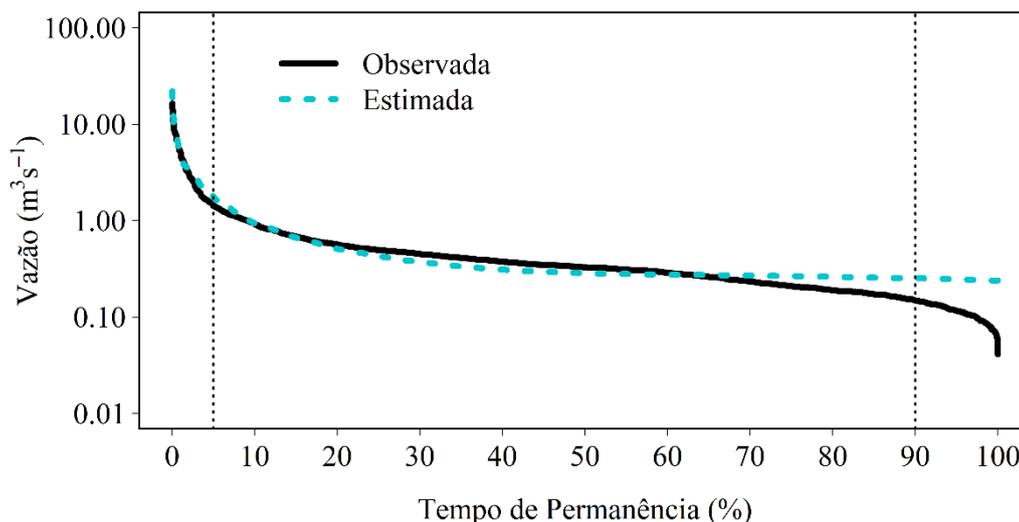
Figura 12 - Vazões médias diárias acumuladas para os períodos de calibração (2006-2012) (a) e validação (2012-2014) (b) da BHRJ.



Fonte: Da autora (2020).

A Figura 13 mostra o percentual do tempo de permanência das vazões médias observadas e simuladas pelo MHD-INPE para a BHRJ. Os resultados mostram um bom ajuste da vazão simulada quando comparado a vazão observada. No tempo de permanência superior a 70% o modelo perde a resposta na representação hidrológica de vazões mínimas. A vazão de referência Q5% observada e simulada na BHRJ foram $1,43 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e $1,76 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. A vazão Q90% observada e simulada foram, respectivamente, $0,15 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e $0,25 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Sendo assim, foi possível observar que o modelo superestimou tanto a Q5% quanto a Q90%.

Figura 13 - Curva de permanência da vazão média diária observada e simulada pelo MHD-INPE na BHRJ. O eixo da vazão está na escala logarítmica.



Fonte: Da autora (2020).

4.2. Correção de erros sistemáticos e projeções climáticas

Comparando-se as projeções climáticas dos modelos atmosféricos (Eta-HadGEM2-ES, Eta-MIROC5 e Eta-CanESM2) para o clima presente (1961-2005) e as observações da estação meteorológica de Lavras para o mesmo período, verificou-se uma grande diferença entre os dados meteorológicos, indicando a necessidade de realizar a correção de erros sistemáticos dessas projeções, tanto do clima presente quanto do clima futuro (2006-2040, 2041-2070 e 2071-2099), antes destas serem utilizadas como entrada no MHD-INPE. Ressalta-se que todas as variáveis meteorológicas requeridas pelo MHD-INPE foram corrigidas (Apêndice A), no entanto, para simplificar a apresentação dos resultados, foram apresentadas a precipitação total e a temperatura média. Estas variáveis são essenciais em estudos hidrológicos, além de serem amplamente utilizadas para avaliar a tendência de mudanças climáticas (ASF AW et al., 2018, IPCC, 2007).

As Figuras 14 e 15 mostram no clima presente (1961-2005) as simulações da precipitação total mensal e temperatura média mensal dos modelos Eta-HadGEM2-ES, Eta-MIROC5 e Eta-CanESM2 na BHRJ sem correção, os dados mensais observados na estação meteorológica de Lavras e os dados simulados corrigidos. As projeções da precipitação total mensal e temperatura média mensal também são apresentadas nas Figuras 14 e 15, durante os três períodos dos cenários de emissão, RCP4.5 e RCP8.5 (2006-2040, 2041-2070 e 2071-2099). As Figuras 16 e 17 mostram o percentual da mudança na precipitação total mensal e temperatura média mensal durante os períodos 2006-2040, 2041-2070 e 2071-2099 (RCP4.5 e

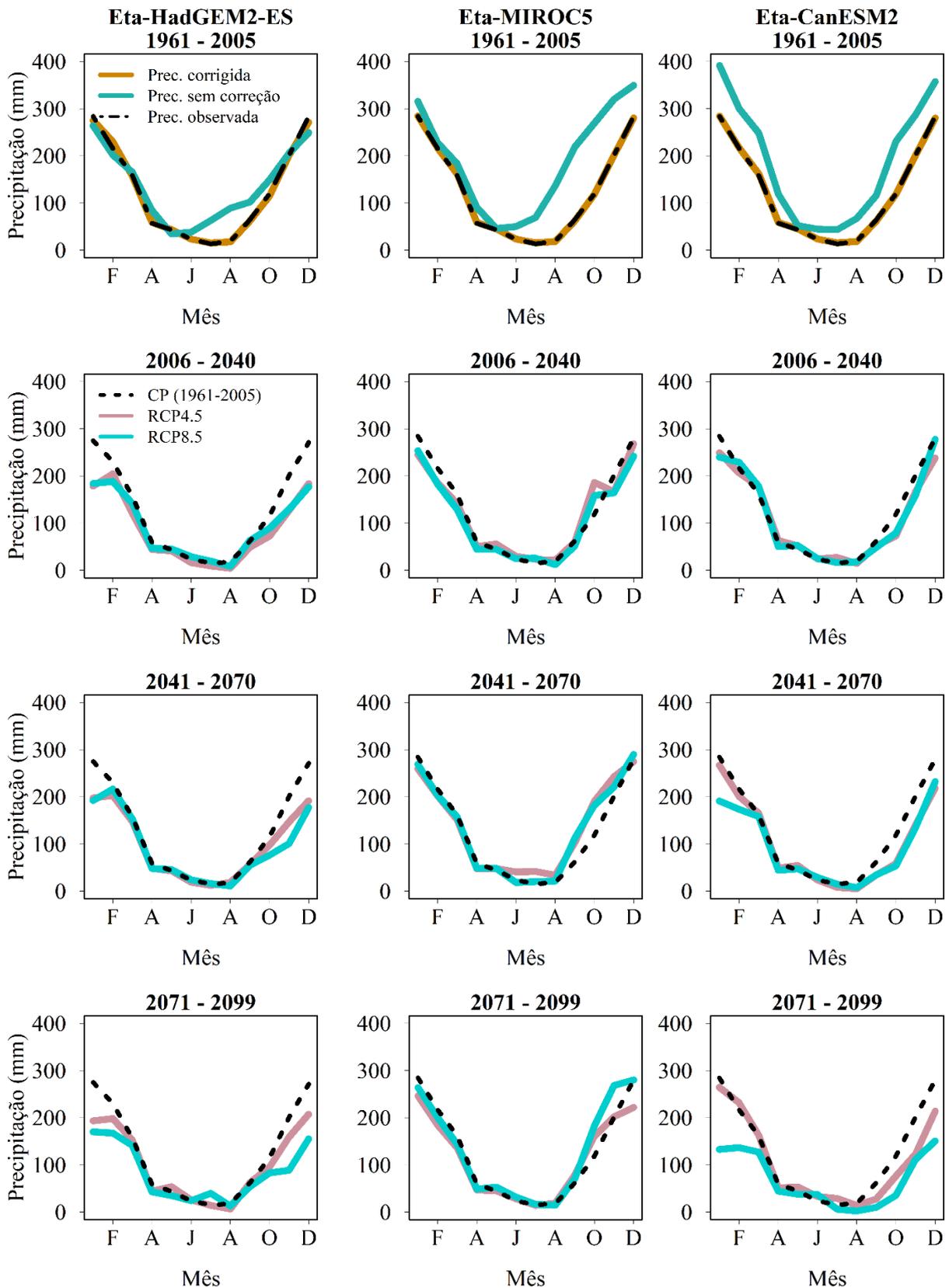
RCP8.5), quando comparados ao clima presente para os modelos Eta-HadGEM2-ES, Eta-MIROC5 e Eta-CanESM2.

Os resultados dos dados mensais de precipitação total e temperatura média projetados pelos três modelos sugerem que foi possível capturar os padrões de variações mensais até o final do século, por meio dos cenários RCP4.5 e RCP8.5, quando comparados aos resultados do clima presente. Sendo assim, no período chuvoso os meses de outubro a março apresentam valores máximos mensais médios de precipitação total e temperatura média. Já no período seco, os meses de abril a setembro apresentam valores mínimos médios de precipitação total e temperatura média (Figuras 14 e 15).

Na Figura 16, os cenários climáticos futuros ao longo do século XXI resultaram em redução mensal da precipitação de até 75,2% (RCP4.5, no mês de agosto, durante o período de 2006-2040), 35,6% (RCP8.5, no mês de agosto, durante o período de 2006-2040) e 87,3% (RCP8.5, no mês de agosto, durante o período de 2071-2099) e aumento mensal de até 165,4% (RCP8.5, no mês de julho, durante o período 2071-2099), 167,2% (RCP4.5, no mês de julho, durante o período 2041-2070) e 85,3% (RCP4.5, no mês de julho, durante o período 2071-2099), com os modelos Eta-HadGEM2-ES, Eta-MIROC5 e Eta-CanESM2, respectivamente. Essas mudanças indicam redução mensal da precipitação total de até 16,1 mm (RCP4.5, no mês de agosto, durante o período de 2006-2040) e aumento mensal de até 26,0 mm (RCP4.5, no mês de julho, durante o período de 2041-2070), com as projeções dos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5.

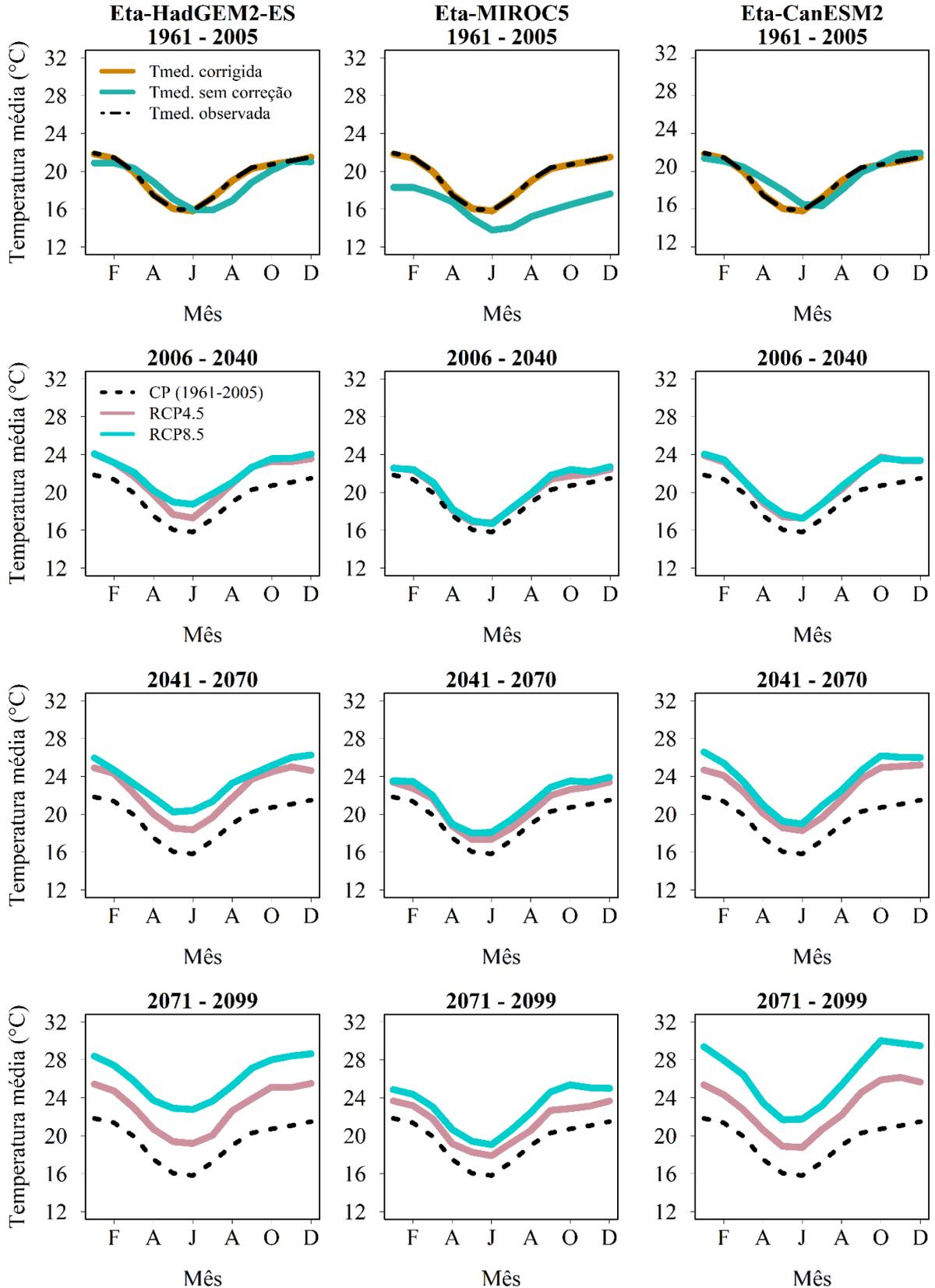
Na Figura 17, existe um consenso geral de aumento de temperatura média projetada com os três modelos climáticos em todos os meses do ano. As mudanças mensais da temperatura são notavelmente maiores para os modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 do que para o Eta-MIROC5, principalmente no RCP8.5. Os maiores aumentos da temperatura ocorreram no final do século XXI (2071-2099) para todos os modelos. Os cenários climáticos futuros ao longo do século resultaram em aumento mensal da temperatura de até 43,9% (RCP8.5, no mês de junho, durante o período 2071-2099), 22,4% (RCP8.5, no mês de outubro, durante o período 2071-2099) e 44,8% (RCP8.5, no mês de outubro, durante o período 2071-2099), com os modelos Eta-HadGEM2-ES, Eta-MIROC5 e Eta-CanESM2, respectivamente. Essas mudanças indicam aumento mensal da temperatura média de até 9,3 °C (em outubro), com as projeções dos modelos Eta-CanESM2, no cenário RCP8.5.

Figura 14 - Precipitação total (Prec) mensal observada (Lavras - INMET), precipitação total mensal sem correção e corrigida (BHRJ) para o clima presente (CP) (1961-2005). Na sequência, precipitação mensal total corrigida para o clima presente e cenários RCP4.5 e RCP8.5 (2006-2040, 2041-2070 e 2071-2099).



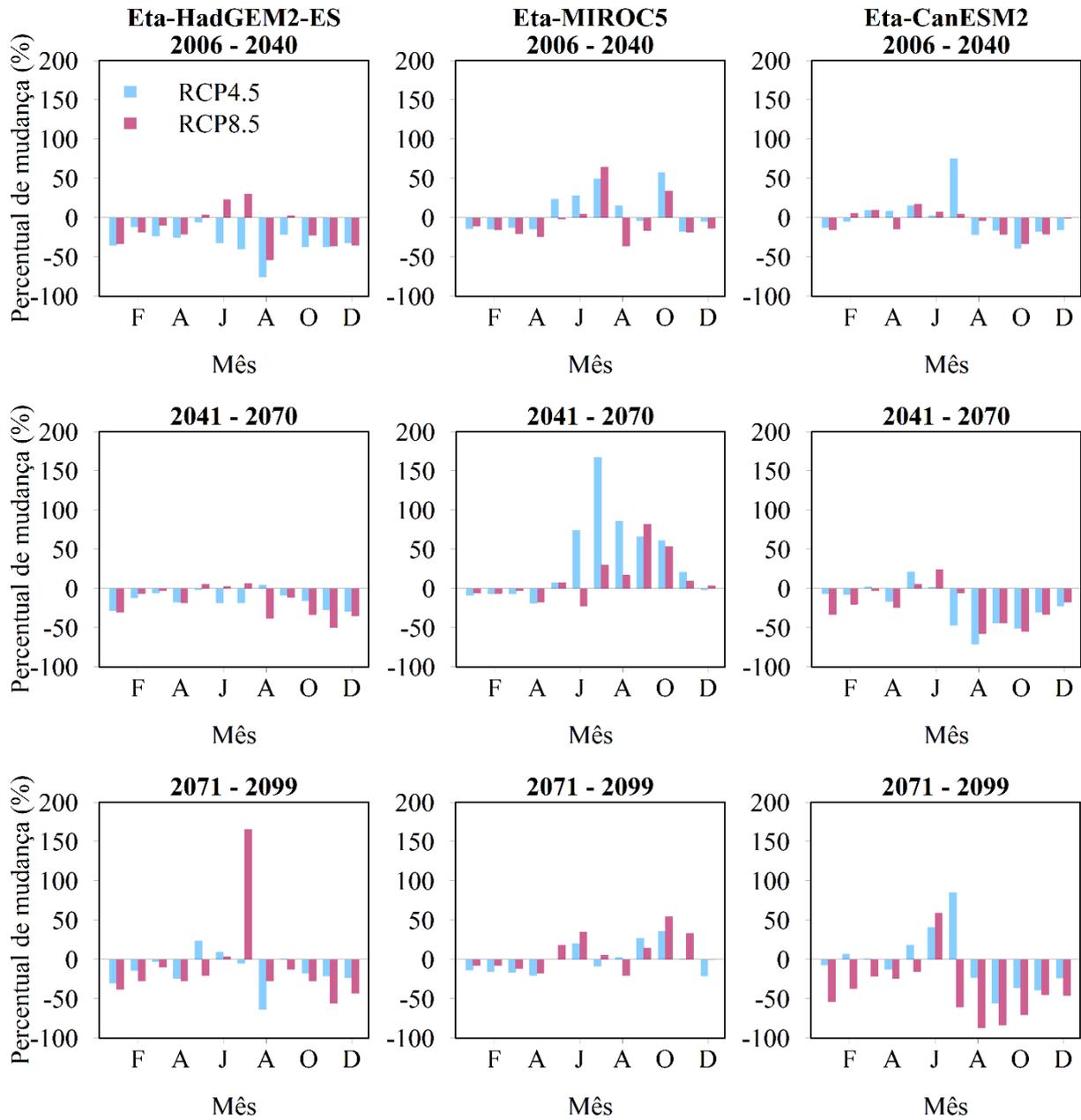
Fonte: Da autora (2020).

Figura 15 - Temperatura média (Tmed) mensal observada (Lavras - INMET), temperatura média mensal sem correção e corrigida (BHRJ) para o clima presente (CP) (1961-2005). Na sequência, temperatura média mensal corrigida para o clima presente e cenários RCP4.5 e RCP8.5 (2006-2040, 2041-2070 e 2071-2099).



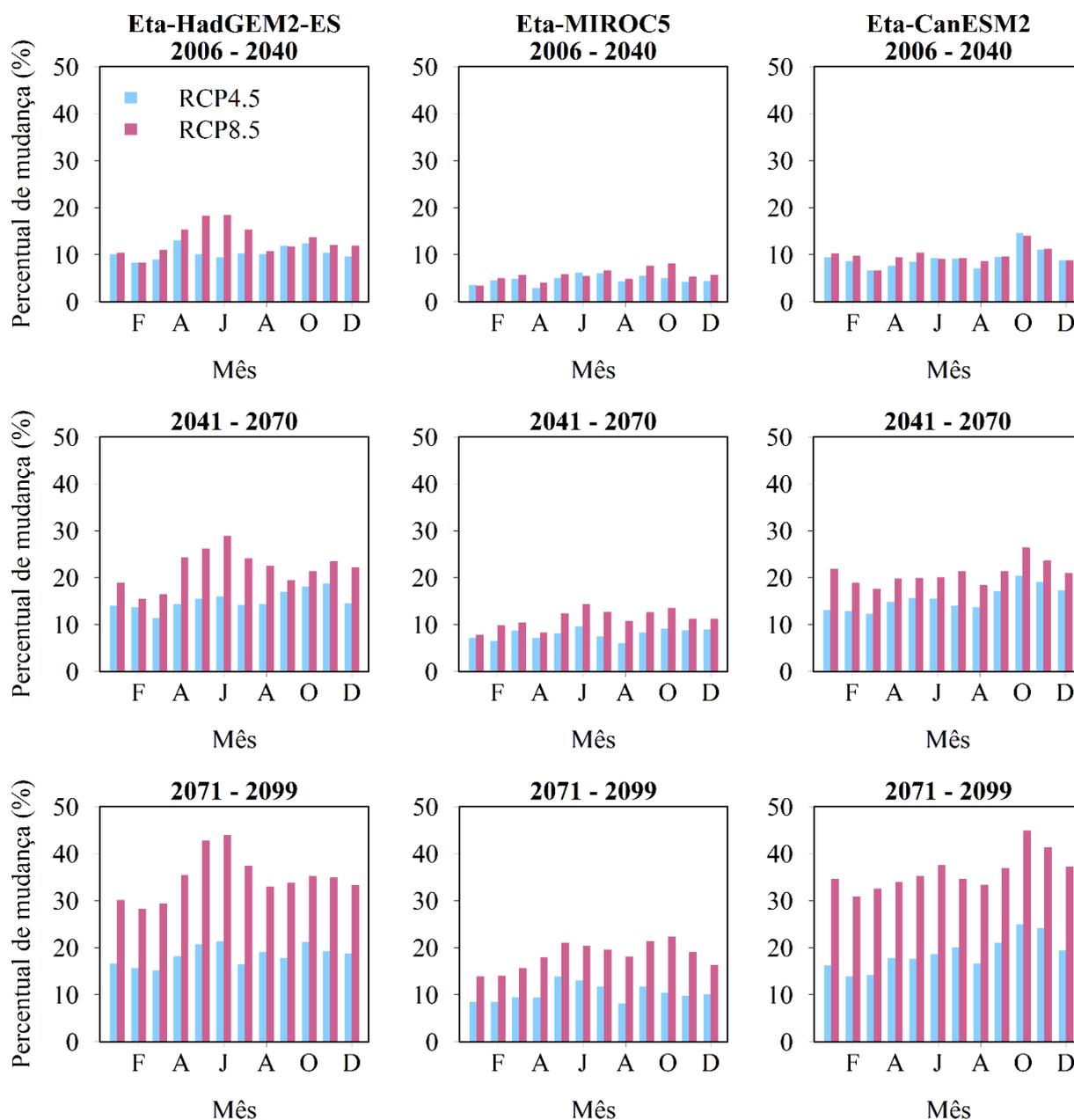
Fonte: Da autora (2020).

Figura 16 - Percentual de mudança da precipitação total mensal no clima futuro (2006-2040, 2041-2070 e 2071-2099), sob os cenários RCP4.5 e RCP8.5, em relação ao clima presente (1961-2005) para todos os modelos climáticos.



Fonte: Da autora (2020).

Figura 17 - Percentual de mudança da temperatura média mensal no clima futuro (2006-2040, 2041-2070 e 2071-2099), sob os cenários RCP4.5 e RCP8.5, em relação ao clima presente (1961-2005) para todos os modelos climáticos.



Fonte: Da autora (2020).

A Tabela 11 mostra o percentual de mudança sazonal médio da precipitação total e da temperatura média no clima futuro (2006-2040, 2041-2070 e 2071-2099) em relação ao clima presente (1961-2005) na BHRJ. O percentual de mudança sazonal médio refere-se ao conjunto de modelos atmosféricos (*multimodel ensemble*) utilizados no presente estudo. A redução da precipitação total sazonal média é evidente no clima futuro na maioria das estações do ano, com exceção do inverno, onde ocorreram aumentos nos períodos de 2006-

2040 (RCP8.5), 2041-2070 (RCP4.5) e 2071-2099 (RCP4.5 e RCP8.5). Verificou-se maiores reduções da precipitação no verão (até 29,1%) e na primavera (até 20,6%), estações estas que concentram o período chuvoso da região onde a BHRJ está localizada. O modelo Eta-HadGEM2-ES mostrou uma redução de 16,5% (verão, RCP4.5, 2041-2070), aproximando-se do percentual de redução do conjunto de modelos (verão, RCP4.5, 2041-2070), que é de 16,1%. Este valor encontrado nas simulações do Eta-HadGEM2-ES foi o mais próximo do conjunto de modelos atmosféricos apresentado.

Quanto a temperatura média sazonal, observa-se concordância do conjunto de modelos climáticos, sendo possível verificar o aumento gradual ao longo do século (2006-2040, 2041-2070 e 2071-2099), nos RCP4.5 e RCP8.5, em todas as estações do ano. Na primavera, verificou-se os maiores aumentos (até 32,2%) da temperatura média sazonal na BHRJ, sendo as maiores mudanças no período de 2071-2099, sob o RCP8.5. As projeções do modelo Eta-CaNESM2 mostraram um aumento de 7,5% (outono, RCP4.5, 2006-2040), valor coincidente com o aumento expressado pelo conjunto de modelos (outono, RCP4.5, 2041-2070).

Tabela 11 - Percentual da mudança da precipitação total e da temperatura média sazonal, projetado no clima futuro (2006-2040, 2041-2070 e 2071-2099) em relação ao clima presente (1961-2005) referentes a média sazonal do conjunto de modelos climáticos para a BHRJ.

Percentual da mudança da precipitação total (%)						
Estação	2006-2040		2041-2070		2071-2099	
	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
Verão	-16,3	-15,6	-13,9	-16,8	-16,1	-29,1
Outono	-5,8	-7,4	-4,4	-4,9	-5,4	-14,8
Inverno	-1,2	+3,9	+19,1	-4,8	+7,4	+8,7
Primavera	-16,6	-17,3	-6,2	-14,9	-13,6	-20,6
Temperatura média (%)						
Estação	2006-2040		2041-2070		2071-2099	
	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
Verão	+7,5	+8,1	+12,0	+16,3	+14,1	+26,5
Outono	+7,5	+9,5	+11,9	+17,1	+15,0	+29,1
Inverno	+7,9	+9,7	+12,2	+19,1	+16,0	+30,7
Primavera	+9,4	+10,4	+15,2	+19,2	+17,8	+32,2

Fonte: Da autora (2020).

Resultados semelhantes ao obtidos no presente estudo foram observados na Bacia Hidrográfica do Rio Grande (BHRG) em relação as projeções da precipitação total e da temperatura média. No que diz respeito a precipitação total da BHRJ, o modelo Eta-HadGEM2-ES apresentou um aumento das temperaturas médias sazonais acima de 6 °C

(RCP8.5, 2071-2099), valor próximo ao encontrado por Alvarenga et al. (2018) com o modelo Eta-HadGEM2-ES, ao notar aumentos superiores a 5 °C nas projeções da temperatura em todas as estações do ano (RCP8.5, 2071-2099). A temperatura média da BHRJ apresentou aumento médio mensal de 2,8 °C (RCP4.5) e 4,4 °C (RCP8.5) com o modelo Eta-HadGEM2-ES, resultados estes similares aos obtidos por Oliveira et al. (2017), que observou aumento médio mensal das temperaturas máximas e mínimas de, respectivamente, 3,1 e 0,5 °C (RCP4.5) e 5,4 e 1,7 °C (RCP8.5). Sendo assim, as pesquisas de Alvarenga et al. (2018) e Oliveira et al. (2017) corroboram os resultados deste estudo.

Os resultados da precipitação média mensal (Figuras 14 e 16) quando comparados aos resultados obtidos por Mello et al. (2015), indicaram tendências hidrológicas distintas. É válido ressaltar que na pesquisa de Mello et al. (2015), o cenário e o modelo climático avaliados são diferente deste estudo (cenário A1B e modelo HadCM3, do AR4). Mello et al. (2015) verificaram, para as bacias de cabeceira da BHRG, aumento da precipitação média mensal, com exceção dos meses de setembro e outubro, em todo o clima futuro (2011-2040, 2041-2070, 2071-2099). Além disso, não foi verificado aumento da precipitação média mensal no mês de novembro para o período 2011-2040. No presente estudo, as projeções também mostraram redução da precipitação mensal para os meses de setembro e outubro no clima futuro (2006-2040, 2041-2070, 2071-2099), exceto nas simulações do modelo Eta-MIROC5. Essa redução pode indicar atraso no processo de início do ano hidrológico na região e implica em um maior esgotamento do fluxo base nesses meses (MELLO et al., 2015; VIOLA et al., 2015).

4.3. Vazão simulada pelo MHD-INPE

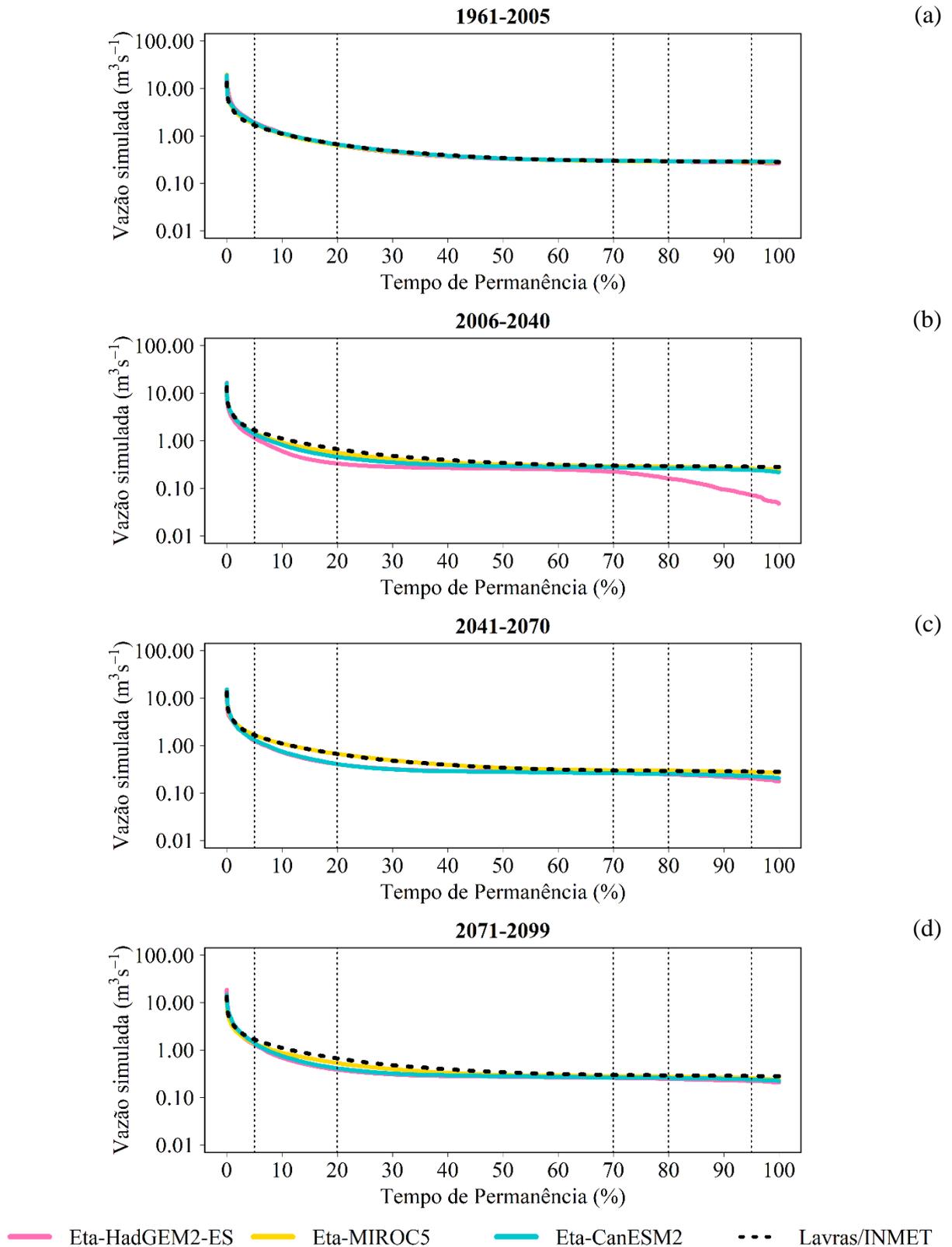
A estação meteorológica da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jaguara (BHRJ) possui dados de monitoramento para o período de 2006 a 2014, conforme mencionado anteriormente, tornando necessária a utilização dos dados da estação meteorológica automática do INMET mais próxima, presente na cidade de Lavras - MG, para corrigir as projeções do clima presente (1961-2005) e do clima futuro (2006-2099) dos modelos climáticos utilizados no presente estudo. Além da vazão simulada no MHD-INPE utilizando as projeções climáticas corrigidas dos modelos, realizou-se, também, a simulação da vazão utilizando os dados meteorológicos da estação de Lavras/INMET como entrada para fins de comparação, de modo que, esta última, foi utilizada como dados de vazão de referência.

As Figuras 18 e 19 mostram a curva de permanência das vazões simuladas pelo MHD-INPE, tanto para os dados de referência (Lavras/INMET) quanto para as projeções climáticas dos modelos Eta-HadGEM2-ES, Eta-MIROC5 e Eta-CanESM2 do clima presente (1961-2005) e do clima futuro (2006-2040, 2041-2070 e 2071-2099), utilizando, respectivamente, os cenários RCP4.5 e RCP8.5.

As curvas de permanência das vazões simuladas por meio das projeções climáticas do modelo Eta mostraram um bom ajuste a curva de permanência obtida por meio das vazões de referência (Lavras/INMET) no clima presente (1961-2005) (Figura 18a e 19a), destacando uma boa performance do modelo MHD-INPE ao utilizar projeções climáticas do modelo Eta como dados de entrada.

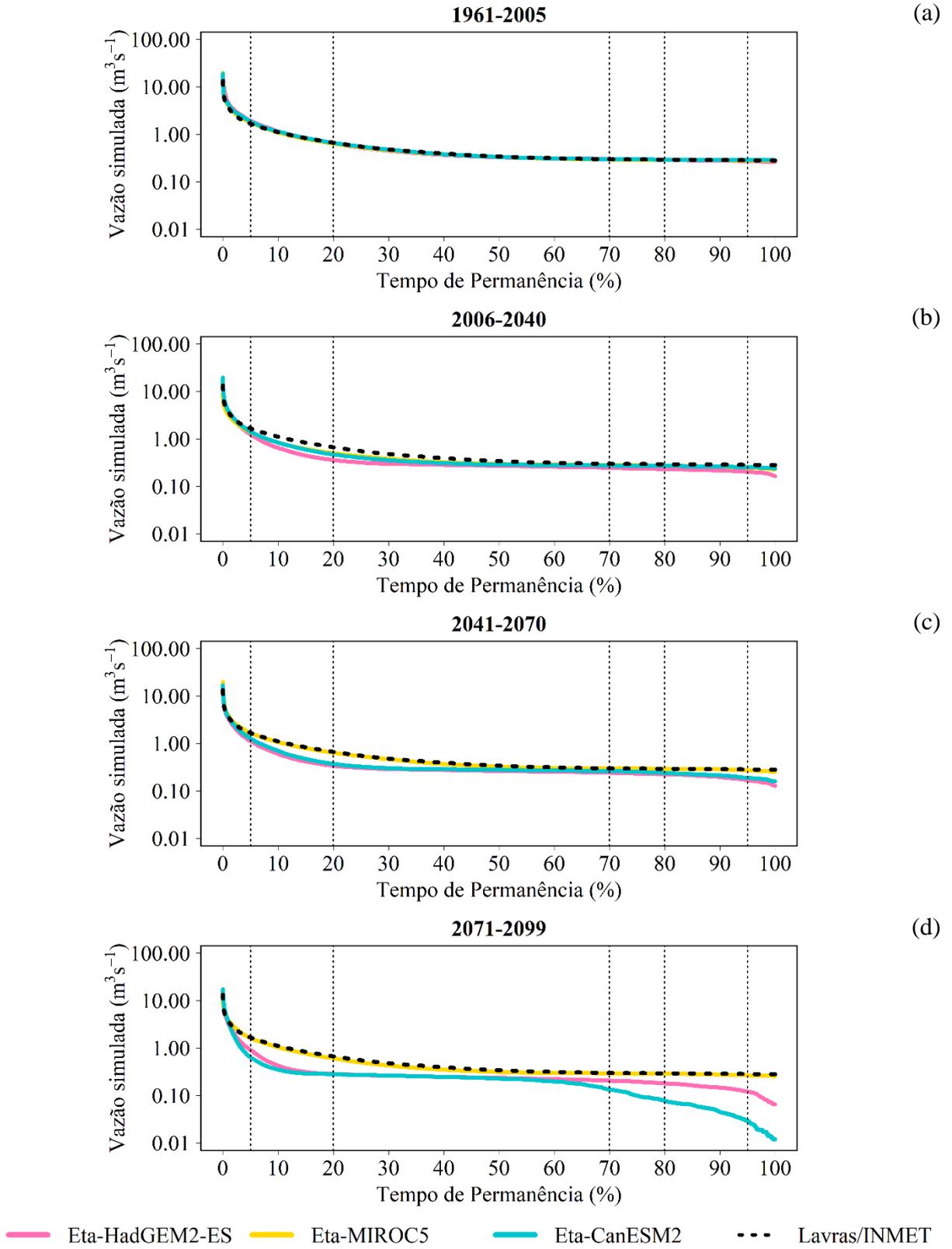
No clima futuro, os modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 mostraram uma clara redução em relação a vazão de referência, tanto para o RCP4.5 quanto para o RCP8.5. A partir da vazão com 70% de permanência, a redução das vazões mínimas mostrou-se mais expressiva no período de 2006-2040 no cenário RCP4.5 (Figura 18b) e no período de 2071-2099 (Figura 19d) no cenário RCP8.5. O modelo Eta-MIROC5 não mostrou mudanças evidentes em comparação a vazão de referência no clima futuro quando comparado as projeções dos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2.

Figura 18 - Curva de permanência das vazões simuladas pelo modelo MHD-INPE, utilizando diferentes dados de entrada do modelo Eta, para o clima presente (1961-2005) e o clima futuro (2006-2040, 2041-2070 e 2071-2099), com o cenário RCP4.5. O eixo das vazões está em escala logarítmica.



Fonte: Da autora (2020).

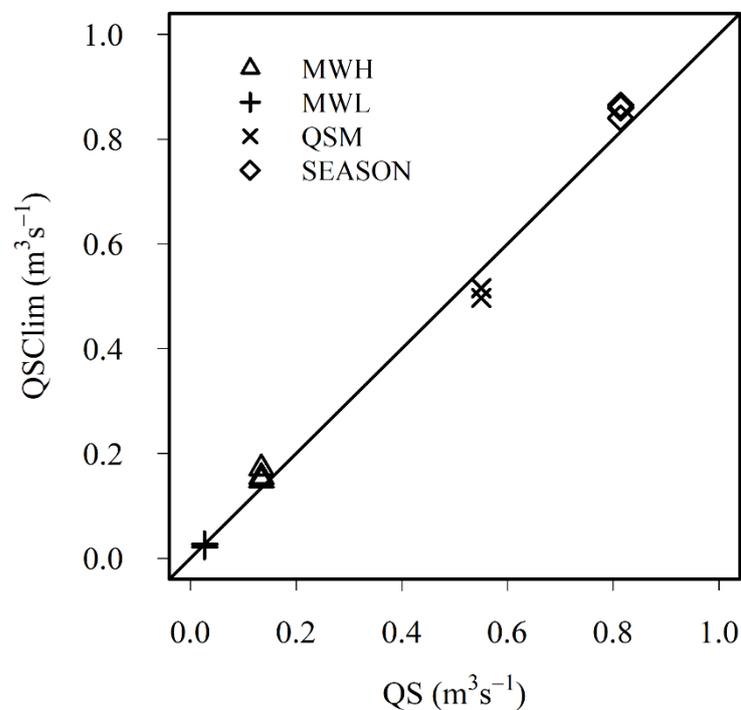
Figura 19 - Curva de permanência das vazões simuladas pelo modelo MHD-INPE, utilizando diferentes dados de entrada do modelo Eta, para o clima presente (1961-2005) e o clima futuro (2006-2040, 2041-2070 e 2071-2099), com o cenário RCP8.5. O eixo das vazões está em escala logarítmica.



Fonte: Da autora (2020).

A Figura 20 mostra os descritores estatísticos da curva de permanência das vazões diárias simuladas pelo MHD-INPE utilizando como entrada os dados meteorológicos de referência e as projeções do modelo Eta para o único ponto de grade da BHRJ no clima presente (1961-2005). De modo geral, os descritores da curva de permanência das vazões obtidas por meio das projeções do modelo Eta mostraram uma estreita aproximação aos descritores oriundos dos dados de referência. É possível observar maiores diferenças na inclinação do segmento médio (Q_{SM}) da curva de permanência, de modo que as projeções subestimaram o valor em relação aos dados de referência. O mesmo aconteceu com o segmento de vazões máximas (MWH) e o indicador de sazonalidade (SEASON), nesse caso, apontando superestimação das vazões obtidas por meio das projeções climáticas.

Figura 20 - Comparação entre os descritores da curva de permanência (MWH, MWL, Q_{SM} e SEASON) da vazão simulada pelo MHD-INPE utilizando como entrada os dados meteorológicos de Lavras/INMET (QS) e as projeções do modelo atmosférico Eta (QSClim) para a BHRJ, no período de 1961-2005.



Fonte: Da autora (2020).

A variabilidade percentual entre os descritores estatísticos (Q_{SM} , SEASON, MWH e MWL) da curva de permanência das vazões simuladas pode ser verificada na Figura 21. O modelo Eta-MIROC5 mostrou um aumento na inclinação do segmento médio (Q_{SM}), exceto no cenário RCP8.5 do período de 2006-2040. O aumento da Q_{SM} também pode ser observado

no mesmo cenário do período de 2071-2099 do modelo Eta-CanESM2. Entretanto, de modo geral, os modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 indicaram redução da Q_{SM} , chegando a uma redução de até 43,22% com o modelo Eta-CanESM2, no cenário RCP8.5, período de 2041-2070 (Figura 21a).

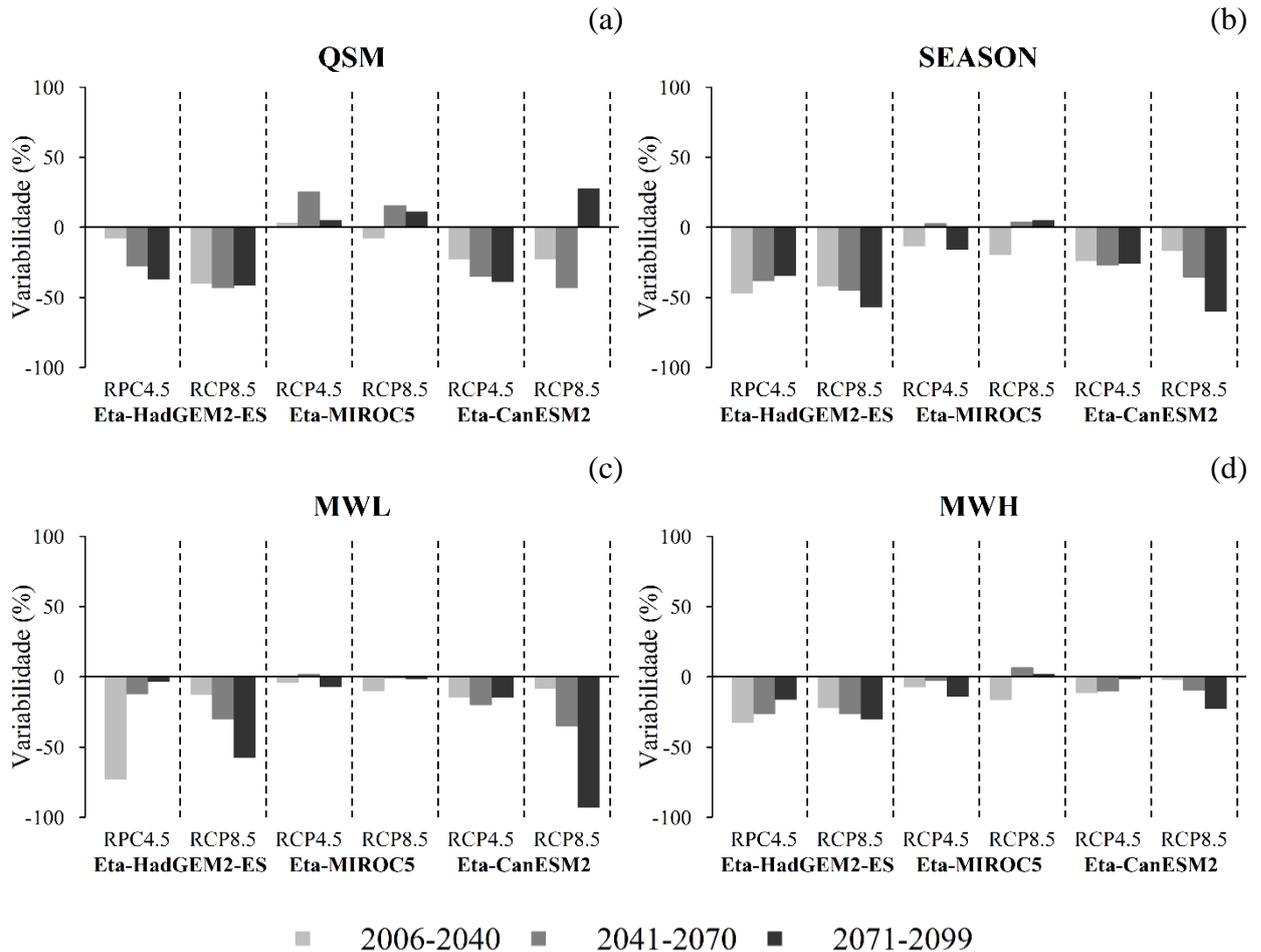
O segmento médio da curva de permanência das vazões (Q_{SM}) está associado a vazões advindas de chuvas moderadas e ao retardamento da resposta do fluxo base a médio prazo, além de representar a variabilidade do segmento médio dos coeficientes de escoamento (LEY et al., 2011; SIQUEIRA JÚNIOR; TOMASELLA; RODRIGUEZ, 2015). Isso significa que quando a curva de permanência apresenta inclinações menos íngremes, observa-se uma redução das respostas das vazões a precipitação (LEY et al., 2011; SIQUEIRA JÚNIOR; TOMASELLA; RODRIGUEZ, 2015), que são uma resposta ao aumento da variabilidade das chuvas intrasazonais, afetando, assim, o escoamento no curso d'água, conforme observado, por exemplo, no cenário RCP8.5 do modelo Eta-CanESM2, no período de 2041-2070 (Figura 21a).

No que diz respeito ao descritor que expressa as diferenças entre as vazões das estações seca (abril a setembro) e chuvosa (outubro a março) (SEASON), foi possível observar uma redução da sazonalidade na maioria das projeções avaliadas (Figura 21b). O modelo Eta-MIROC5 apresentou aumentos não expressivos no período de 2041-2070 (RCP 4.5 e RCP8.5) e 2071-2099 (RCP8.5). Essa redução predominante do descritor SEASON pode ser resultado da grande área de pastagem presente na BHRJ, o que, conseqüentemente, reduz a evapotranspiração e a variabilidade sazonal da umidade do solo (SIQUEIRA JÚNIOR; TOMASELLA; RODRIGUEZ, 2015).

Quanto ao segmento de vazões mínimas, indicado pelo MWL, todas as projeções mostraram uma consistente redução das vazões mínimas, as quais são importantes por serem consideradas como referência em processos envolvendo gestão de recursos hídricos. Essa redução foi mais significativa pelas projeções dos modelos Eta-HadGEM2-ES (cenários RCP4.5 e RCP8.5) e Eta-CanESM2 (cenário RCP8.5), mas não em todos os períodos das projeções, chegando a reduzir até 92,97% no período de 2071-2099 do cenário RCP8.5 nas simulações do modelo Eta-CanESM2 (Figura 21c).

O descritor referente aos segmentos de vazões de pico (MWH) indicou, de modo geral, redução das vazões máximas por meio das projeções climáticas na BHRJ, exceto no cenário RCP8.5 nas simulações do modelo Eta-MIROC5. No entanto, a redução mostrou-se mais acentuada nas projeções do modelo Eta-HadGEM2-ES, reduzindo até 32,7% no período de 2006-2040 no cenário RCP4.5 (Figura 21d).

Figura 21 - Variabilidade (%) entre os descritores estatísticos da curva de permanência das vazões simuladas pelo MHD-INPE utilizando as projeções futuras (2006-2040, 2041-2070 e 2071-2099), nos cenários RCP4.5 e RCP8.5, e as projeções do clima presente (1961-2005) dos modelos Eta-HadGEM2-ES, Eta-MIROC5 e Eta-CanESM2.



Fonte: Da autora (2020).

Vale mencionar que apesar da proximidade dos descritores da curva de permanência da vazão simulada pelos modelos climáticos aos da vazão simulada mantida como referência (Figura 20), a diferença entre eles não é incomum. Oliveira et al. (2017) destacaram que as incertezas relacionadas às estruturas dos modelos climáticos (MCR/MCG), ao forçamento radiativo dos cenários, a parametrização do modelo hidrológico, a redução de escala (*downscaling*) e a correção de erros sistemáticos devem ser consideradas.

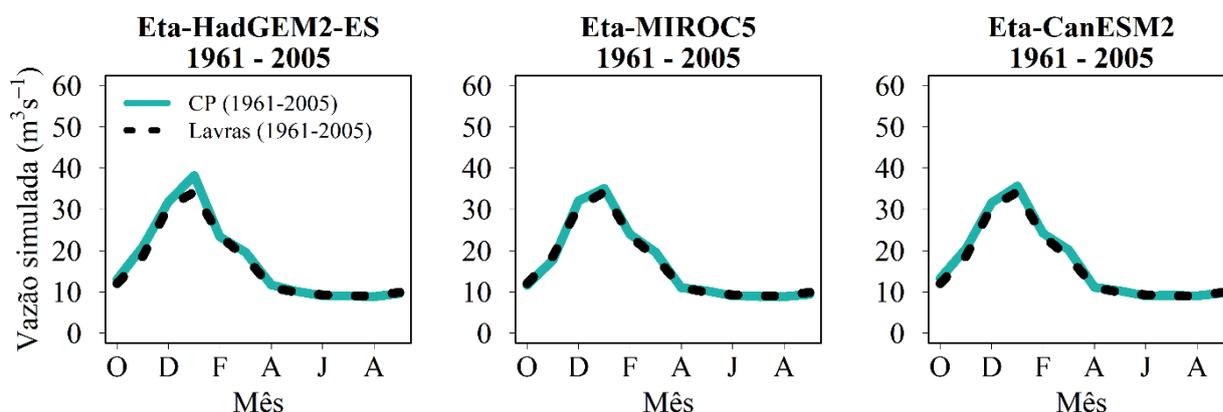
Essas incertezas, no entanto, apresentam pesos diferentes na obtenção do resultado final em estudos envolvendo impactos de mudanças climáticas. Conforme destacado também por Amorim e Chaffe (2019a, 2019b), as incertezas advindas da modelagem hidrológica são usualmente menores do que aquelas referentes aos modelos climáticos e a técnicas regionalização.

As pesquisas de Amorim e Chaffe (2019a, 2019b) também reportam que ao indicar as fontes de incertezas individualmente, a regionalização e a correção de erros sistemáticos são consideradas os fatores mais limitantes. A técnica percentil por percentil, a qual foi abordada no presente estudo, é uma das mais utilizadas em diversos estudos envolvendo mudanças climáticas no Brasil na última década, mostrando-se sofisticada e confiável para fornecer projeções corrigidas (AMORIM; CHAFFE, 2019b). Apesar dos bons resultados obtidos com essa técnica, problemas podem ser encontrados quando a “cauda” da distribuição estatística utilizada é distorcida, fazendo com que eventos extremos pareçam deturpados, e, também, por não considerar diretamente estatísticas que são dependentes do tempo, como dias secos consecutivos (AMORIM; CHAFFE, 2019b).

Ademais, a limitação referente a regionalização das projeções climáticas de MCGs ficou evidente no presente estudo. A resolução horizontal do modelo Eta (20x20 km) não foi capaz de distribuir totalmente o regime de chuvas de uma bacia hidrográfica de pequeno porte como a BHRJ (33 km²). Tal situação também foi observada por Lyra et al. (2018), ao comparar as projeções climáticas do modelo Eta com resolução horizontal de 5 e 20 km, para o RCP4.5 e RCP8.5, em diferentes localidades, onde foi possível notar melhor ajuste utilizando-se projeções climáticas de maior resolução espacial (5 km). No entanto, Amorim e Chaffe (2019b) destacam que o procedimento de modelagem adotado deve ser individual, ou seja, a avaliação e a aplicação devem ser baseadas nas necessidades dos usuários, ao invés de, por exemplo, procurar pela mais alta resolução das projeções climáticas.

A Figura 22 mostra as vazões simuladas utilizando como entrada as projeções climáticas corrigidas dos modelos Eta-HadGEM2-ES, Eta-MIROC5 e Eta-CanESM2 no clima presente-CP (1961-2005) comparadas as vazões de referência no mesmo período.

Figura 22 - Vazão média mensal simulada pelo MHD-INPE, a partir dos dados de entrada das projeções corrigidas do modelo Eta para a BHRJ durante o clima presente (CP) (1961-2005) e dados meteorológicos de referência (Lavras/INMET) no mesmo período.



Fonte: Da autora (2020).

A vazão média mensal simulada pelo modelo MHD-INPE forçado pelas projeções climáticas corrigidas dos modelos Eta-HadGEM2-ES, Eta-MIROC5 e Eta-CanESM2 no clima futuro (2006-2040, 2041-2070 e 2071-2099), sob os cenários RCP4.5 e RCP8.5, estão apresentadas na Figura 23. As vazões simuladas permitiram verificar que o modelo MHD-INPE foi capaz de captar as variações médias mensais, considerando o período chuvoso e seco dessa região, tanto no clima presente (Figura 22 e Tabela 12) quanto no clima futuro (Figura 23), nos cenários RCP's 4.5 e 8.5.

Tabela 12 - Vazão média mensal das estações seca (abril a setembro) e chuvosa (outubro a março) do clima presente (1961-2005) dos modelos climáticos comparada a vazão média mensal do período de observação (2006-2014) da BHRJ.

Estação	Vazão média mensal (m³ s⁻¹)			Observada
	Eta-HadGEM2-ES	Eta-MIROC5	Eta-CanESM2	
Seca	9,75	9,60	9,73	9,31
Chuvosa	24,48	23,35	24,22	24,25

Fonte: Da autora (2020).

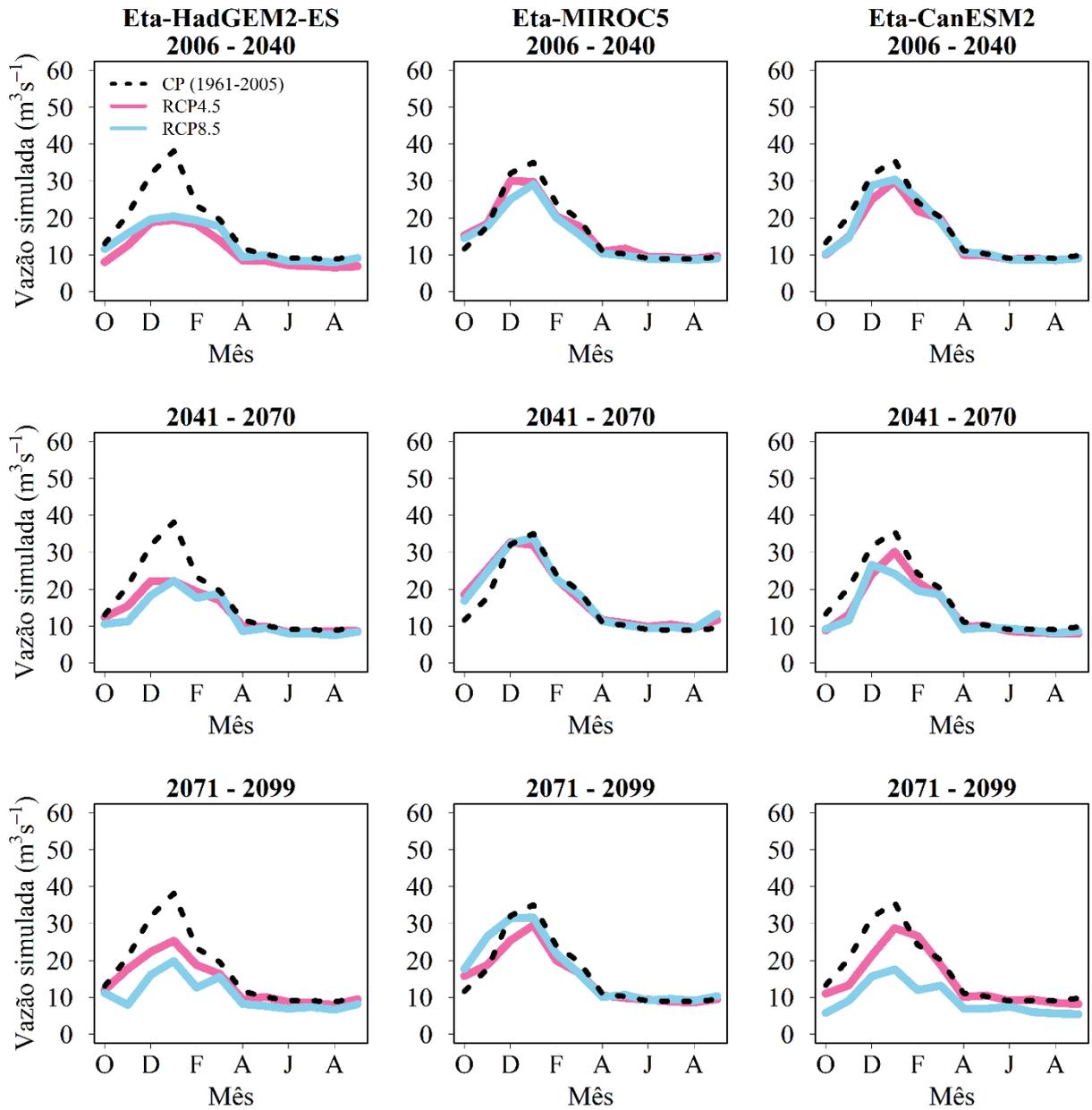
A Figura 24 mostra o percentual da mudança na vazão simulada durante os períodos 2006-2040, 2041-2070 e 2071-2099 (RCP4.5 e RCP8.5), quando comparados ao clima presente (1961-2005), para os três modelos climáticos. Os modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 mostraram, predominantemente, redução das vazões médias mensais ao longo do clima futuro, chegando a reduzir até 62,09% em novembro no período de 2071-2099, no cenário RCP8.5 do modelo Eta-HadGEM2-ES. Essas mudanças não foram similares as

mudanças do modelo Eta-MIROC5, o qual mostrou aumentos nos meses de setembro (40,78%, período de 2041-2070, no cenário RCP8.5), outubro (58,82%, período de 2041-2070 no cenário RCP4.5) e novembro (49,93%, período de 2071-2099 no cenário RCP8.5).

Os resultados obtidos por Oliveira et al. (2017) na região, ao simular a vazão com o modelo SWAT, utilizando como entrada as projeções do modelo Eta-HadGEM2-ES, nos cenários RCP4.5 e RCP8.5, diferem dos resultados obtidos no presente estudo. Os autores encontraram reduções mais severas durante o período de 2007-2040, sob ambos os cenários. Por outro lado, as simulações utilizando as projeções futuras do RCP8.5 indicaram maiores reduções da vazão média mensal no final do século (2071-2099) em todos os pontos avaliados, variando de 49,6 a 69,4%. Esses valores aproximam-se aos que foram encontrados no presente estudo na BHRJ, onde as reduções foram de 14,09 a 62,09% com o Eta-HadGEM2-ES no mesmo período (2071-2099) (Figura 24).

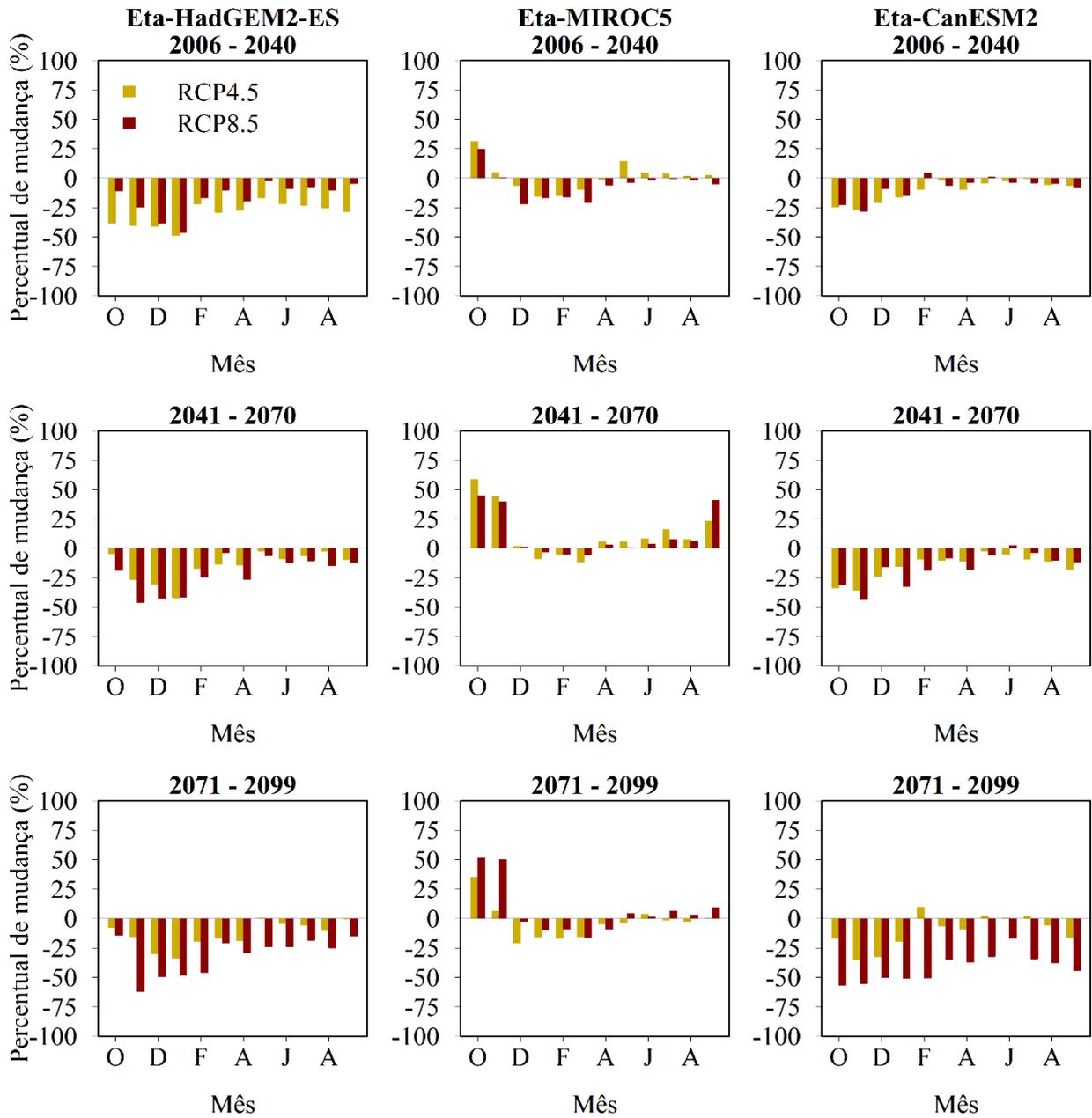
Assim como observado por Alvarenga et al (2016) em seu trabalho, a sazonalidade da vazão média mensal (Figuras 22 e 23) manteve-se coerente com a sazonalidade da precipitação média mensal (Figura 14), para todos os períodos de tempo e cenários. De modo geral, as vazões máximas simuladas situaram-se entre os meses de outubro a março e as mínimas de abril a setembro. Os resultados também evidenciaram que a hidrologia da BHRJ é fortemente influenciada pela estação úmida, de modo que os efeitos das mudanças na estação seca foram menos pronunciados do que na estação chuvosa.

Figura 23 - Vazão média mensal simulada pelo MHD-INPE, a partir de diferentes entradas, projeções do modelo Eta para a BHRJ no clima presente (CP-1961-2005) e os cenários RCP4.5 e RCP8.5 (2006-2040, 2041-2070 e 2071-2099).



Fonte: Da autora (2020).

Figura 24 - Percentual de mudança da vazão simulada pelo MHD-INPE para o clima futuro (2006-2040, 2041-2070 e 2071-2099), nos cenários RCP4.5 e RCP8.5, em relação ao clima presente (1961-2005) para todos os modelos climáticos.



Fonte: Da autora (2020).

A Tabela 13 mostra o percentual de mudança sazonal média, referente a abordagem do conjunto de multi-modelos da vazão simulada pelo MHD-INPE no clima futuro (2006-2040, 2041-2070 e 2071-2099) em relação ao clima presente (1961-2005), na BHRJ. De modo geral, observou-se concordância do conjunto de modelos climáticos, evidenciando uma redução não gradativa, no clima futuro (2006-2040, 2041-2070 e 2071-2099), sob os RCP4.5 e RCP8.5, em todas as estações do ano. As maiores reduções da vazão simulada foram

verificadas no verão, chegando a 35,1% no cenário RCP8.5 no período de 2071-2099. Esse valor mostrou-se coerente com a variação percentual da precipitação na Tabela 11, onde as projeções do cenário RCP8.5 no período de 2071-2099 evidenciaram redução acentuada das chuvas no verão. Este fato, combinado ao visível aumento da temperatura média no clima futuro, podem tornar a disponibilidade hídrica incerta na BHRJ ao reduzir o escoamento superficial direto.

O modelo Eta-CanESM2 mostrou uma redução de 3,9% (inverno, cenário RCP8.5, 2041-2070) e aproximando-se do valor do percentual de redução do conjunto de modelos (inverno, RCP8.5, 2041-2070), que é de 3,5%. O mesmo também pode ser observado com o modelo Eta-MIROC5, que apresentou uma redução de 9,7% (outono, cenário RCP4.5, 2071-2099), ou seja, valor próximo a redução de 9,2% do conjunto de modelos (outono, RCP4.5, 2071-2099). Estes valores encontrados nas simulações do Eta-CanESM2 e Eta-MIROC5 foram os mais próximos dos valores do conjunto de modelos atmosféricos apresentado na Tabela 13.

Tabela 13 - Percentual da mudança da vazão simulada pelo MHD-INPE, projetado no clima futuro (2006-2040, 2041-2070 e 2071-2099) em relação ao clima presente (1961-2005) referentes a média sazonal do conjunto de modelos climáticos para a BHRJ.

Percentual da mudança da vazão simulada pelo MHD-INPE (%)						
Estação	2006-2040		2041-2070		2071-2099	
	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
Verão	-22,5	-20,9	-17,5	-21,0	-21,0	-35,1
Outono	-10,5	-9,1	-7,4	-7,6	-9,2	-22,6
Inverno	-7,7	-4,7	-1,1	-3,5	-2,5	-16,1
Primavera	-15,5	-10,5	-1,2	-7,1	-7,1	-16,7

Fonte: Da autora (2020).

A Figura 25 mostra as trajetórias temporais da dispersão do índice de evaporação (ϵ) em relação ao índice de aridez (ϕ), obtidos por meio das simulações do MHD-INPE utilizando as projeções do modelo Eta como entrada. O método de Budyko foi aplicado ao clima presente (CP), que é o período compreendido entre 1961-2005, e o clima futuro, o qual foi subdividido em T1 (2006-2040), T2 (2041-2070) e T3 (2071-2099), sob os cenários RCP4.5 e RCP8.5.

O índice de aridez para o clima presente (0,80) das projeções do modelo Eta indicou que a evapotranspiração na BHRJ foi limitada pela energia disponível nesse período. Comparando-se o clima presente (CP) com o clima futuro (T1, T2, T3) do Eta-HadGEM2-ES, os valores de ϕ foram maiores que um, o que implica em aumento da aridez na BHRJ, visto

que a evapotranspiração passou a ser limitada pelo abastecimento de água (Figura 25a e 25b). Tais resultados são coerentes com as projeções climáticas do modelo Eta-HadGEM2-ES (Figura 14 e 16), as quais apresentaram uma predominante redução da precipitação ao longo do século XXI.

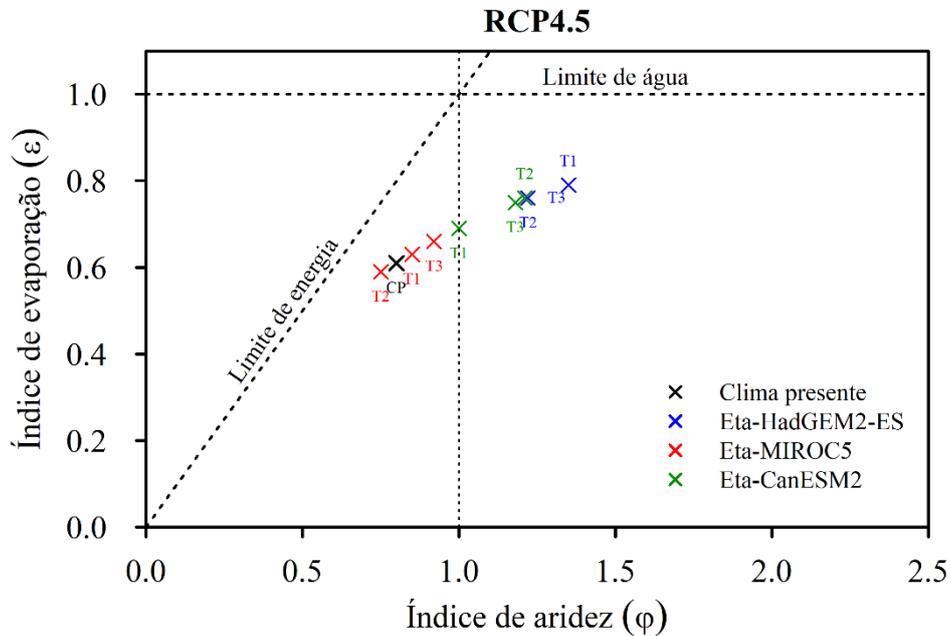
Por meio das projeções do Eta-MIROC5, observou-se que os índices de aridez variaram no clima futuro (T1, T2 e T3) em relação ao clima presente (1961-2005), no entanto, os valores mostraram consenso e permaneceram abaixo de um, o que implica limitação pela energia disponível até o final do século, em ambos os cenários (Figura 25a e 25b). Situação semelhante também pode ser observada na avaliação das projeções climáticas da precipitação total mensal (Figura 14 e 16), da temperatura média mensal (Figura 15 e 17) e na vazão média mensal do modelo Eta-MIROC5 (Figura 19), que mostrou menor variação na obtenção dos resultados quando comparado aos outros modelos.

O Eta-CanESM2 não mostrou consenso como os outros modelos climáticos, mostrando maiores variações no clima futuro quando comparado ao clima presente. Os índices de aridez do período de T1 (2006-2040) foram 1,00 e 0,99, para o RCP4.5 e o RCP8.5, respectivamente. Nos demais períodos (T2 e T3), os valores de ϕ foram superiores a um em ambos os cenários climáticos (Figura 25a e 25b), mostrando mudança em relação ao clima presente ao destacar a limitação da evapotranspiração pelo fornecimento de água. Por meio das projeções do Eta-CanESM2 obteve-se o maior índice de aridez, o qual foi de 2,38 no período T3 (2071-2099) do cenário mais pessimista (Figura 25b).

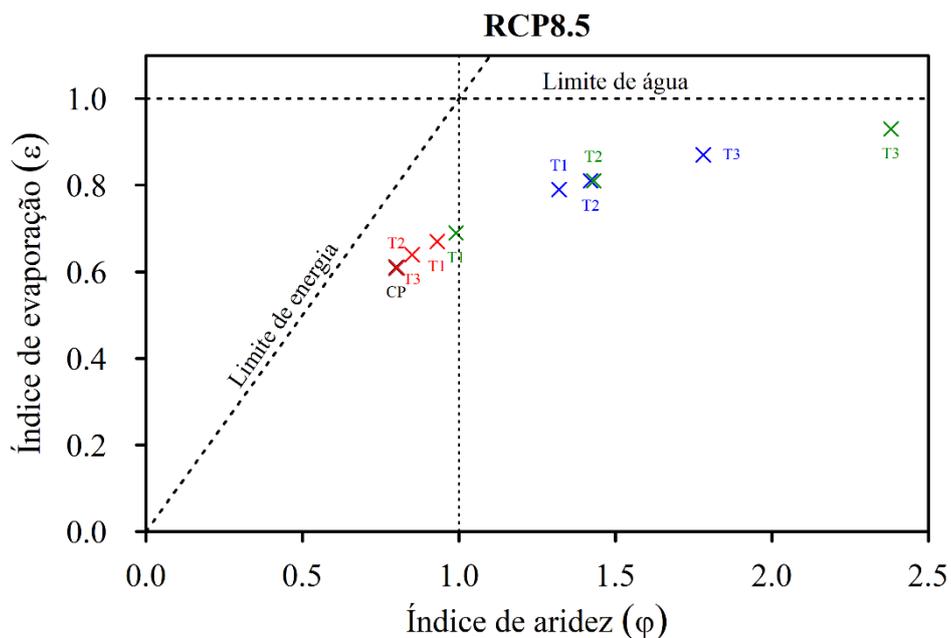
Dessa forma, é possível observar que a avaliação do índice de aridez na BHRJ sugere um risco de escassez hídrica no clima futuro (2006-2040, 2041-2070 e 2071-2099). A limitação da evapotranspiração pelo abastecimento de água ($\phi > 1$) foi evidenciada por meio das projeções dos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 e pode afetar diretamente o consumo humano, a geração de energia hidrelétrica e agricultura na bacia até o final do século XXI, assim como observado por Alvarenga et al. (2018).

Figura 25 - Trajetórias temporais da dispersão de ε ($ET_R/PREC$) versus ϕ ($ET_P/PREC$) ao longo da curva de Budyko para o RCP4.5 (a) e RCP8.5 (b) dos modelos Eta-HadGEM2-ES, Eta-MIROC5 e Eta-CanESM2.

(a)



(b)



Fonte: Da autora (2020).

4.4. Considerações finais

Caso as projeções climáticas se concretizem até o final do século, é possível que haja queda ou, até mesmo, inviabilização da produtividade de pequenos agricultores que habitam a

região da BHRJ, principalmente, de milho, visto que a safra no estado de Minas Gerais ocorre no período (outubro – janeiro) em que se observou elevada redução da precipitação e da vazão ao longo das análises. Além disso, do ponto de vista do ciclo hidrológico, o constante aumento da temperatura ao longo do século faz com que as taxas de evaporação também aumentem, elevando os níveis de vapor d'água na atmosfera e deixando a disponibilidade hídrica imprevisível para a região.

Em geral, observou-se que os cenários de mudanças climáticas afetam as vazões da BHRJ. Entretanto, vale ressaltar que os resultados mostram variabilidade entre os modelos climáticos, causada pela cadeia de incertezas de cada um dos modelos climáticos utilizados no presente estudo. Além disso, destaca-se, também, a incertezas relacionadas ao forçamento radiativo dos cenários, a parametrização do modelo hidrológico, a redução de escala (*downscaling*) e a correção de erros sistemáticos.

O modelo MHDP-INPE se mostrou apto a prever impactos provenientes de mudanças climáticas em bacias de pequeno porte. Entretanto, para uma análise mais robusta, recomenda-se que trabalhos futuros simulem a vazão futura no passo de tempo horário, visto que o modelo hidrológico apresentou dificuldades pontuais em representar a resposta hidrológica no passo de tempo diário na BHRJ para o período de validação (set/2012-out/2014). No presente estudo, as projeções climáticas foram utilizadas no passo de tempo diário devido a incompatibilidade das projeções horárias com a metodologia percentil por percentil adotada na correção de erros sistemáticos. Além disso, recomenda-se também o uso de modelos de previsão de produtividade agrícola em combinação com o modelo hidrológico, para explorar ações de adaptação no futuro, por exemplo, quanto a produção de eucalipto, milho e consumo de água para irrigação.

5. CONCLUSÕES

Neste estudo, avaliou-se os impactos das mudanças climáticas na vazão simulada pelo modelo hidrológico MHD-INPE. Utilizou-se como entrada as projeções climáticas futuras do modelo atmosférico Eta para um único ponto de grade presente na Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jaguara (BHRJ), localizada na região sul do estado de Minas Gerais. Sendo assim, pode-se concluir o seguinte:

- O modelo hidrológico MHD-INPE representou de forma satisfatória a vazão na BHRJ, de acordo com os índices estatísticos aplicados na análise de desempenho do modelo. Dessa forma, o modelo mostrou-se apto para simular a vazão futura na bacia por meio das projeções climáticas do modelo Eta;
- Todos os modelos climáticos preveem aumentos da temperatura média anual para a área investigada. A direção da tendência anual da precipitação total não é a mesma para todos os modelos climáticos. Embora os resultados mostrem variabilidade entre os modelos, os cenários indicaram consenso na redução da precipitação nos meses iniciais do ano hidrológico (outubro a dezembro);
- A redução da precipitação total sazonal média, proveniente do conjunto de multi-modelos, é evidente no clima futuro na maioria das estações do ano, com exceção apenas do inverno;
- De modo geral, os descritores estatísticos da curva de permanência das projeções do modelo Eta mostraram um bom desempenho do MHD-INPE na simulação do clima presente (1961-2005), ou seja, as projeções do clima presente associadas a correção de erros sistemáticos representaram a hidrologia da bacia no mesmo período;
- Ressalta-se ainda que a inclinação do segmento médio (Q_{SM}) não apresentou consenso com as projeções climáticas do modelo Eta no futuro, para ambos os cenários climáticos. Quanto a diferença entre as vazões das estações seca e chuvosa (SEASON), o segmento de vazões mínimas (MWL) e o segmento de vazões máximas (MWH) foi possível observar, em geral, uma redução em todas as projeções avaliadas ao longo do século XXI, nos cenários RCP4.5 e RCP8.5;
- O conjunto de modelos climáticos mostraram-se coerentes quanto a redução da vazão sazonal média no clima futuro (2006-2040, 2041-2070 e 2071-2099), tanto no RCP4.5 quanto no RCP8.5, em todas as estações do ano. As maiores reduções da vazão simulada foram verificadas no verão (35,1%), assim como na precipitação total média sazonal, ambas no RCP8.5 do período de 2071-2099;
- A sazonalidade da vazão média mensal manteve-se coerente com a sazonalidade da precipitação média mensal para todos os períodos de tempo e cenários, de modo que as vazões máximas simuladas se situaram entre os meses de outubro a março e as mínimas de abril a setembro;

- Analisando a curva de Budyko, os modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 mostraram risco de escassez hídrica na BHRJ no futuro ao limitarem a evapotranspiração pelo fornecimento de água.

6. REFERÊNCIAS

ALVARENGA, L. A. et al. Hydrological responses to climate changes in a headwater watershed. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 40, n. 6, p. 647-657, 2016.

ALVARENGA, L. A. et al. 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**, Lavras, v. 7, n. 02, p. 355, 2018.

ALVES, G. J. et al. Assessment of the Soil Conservation Service - Curve Number method performance in a tropical Oxisol watershed. **Journal of Soil and Water Conservation**, Lavras, v. 74, n. 5, p. 500-512, 2019.

AMORIM, P. B.; CHAFFE, P. L. B. Towards a comprehensive characterization of evidence in synthesis assessments: the climate change impacts on the Brazilian water resources. **Climatic Change**, Florianópolis, v. 155, n. 1, p. 37-57, 2019a.

AMORIM, P. B.; CHAFFE, P. L. B. Integrating climate models into hydrological modelling: What's going on in Brazil? **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Florianópolis, v. 24, p. 1-17, 2019b.

ANDRADE, M. A.; MELLO, C. R.; BESKOW, S. Hydrological simulation in a watershed with predominance of Oxisol in the Upper Grande river region, MG-Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Lavras, v. 17, n. 1, p. 69-76, 2012.

ARORA, V. K. et al. Carbon emission limits required to satisfy future representative concentration pathways of greenhouse gases. **Geophysical Research Letters**, Victoria, v. 38, n. 5, p.1-6, 2011.

ASFAW, A et al. Variability and time series trend analysis of rainfall and temperature in northcentral Ethiopia: A case study in Woleka sub-basin. **Weather and Climate Extremes**, Addis Ababa, v. 19, p. 29-41, 2018.

ÁVILA, L. F. et al. Tendências de temperaturas mínimas e máximas do ar no Estado de Minas Gerais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Lavras, v. 49, n. 4, p. 247-256, 2014.

BÁRDOSSY, A.; PEGRAM, G. Downscaling precipitation using regional climate models and circulation patterns toward hydrology. **Water Resources Research**, v. 47, n. 4, p. 1-18, 2011.

BESKOW, S. et al. Performance of a distributed semi-conceptual hydrological model under tropical watershed conditions. **Catena**, Pelotas, v. 86, n. 3, p. 160-171, 2011a.

BESKOW, S. et al. Development, sensitivity and uncertainty analysis of LASH model. **Scientia Agricola**, Pelotas, v. 68, n. 3, p. 265-274, 2011b.

BESKOW, S. et al. Hydrological prediction in a tropical watershed dominated by Oxisols using a distributed hydrological model. **Water Resources Management**, Pelotas, v. 27, n. 2, p. 341-363, 2013.

BESKOW, S. et al. Geomorphology-based unit hydrograph models for flood risk management: case study in Brazilian watersheds with contrasting physiographic characteristics. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Pelotas, v. 90, n. 2, p. 1873-1890, 2018.

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

BONATTI, J. P. Modelo de circulação geral atmosférico do CPTEC. **Climanalise**, 1996. Disponível em: <<http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/cliesp10a/bonatti.html>>. Acesso em: 14 abr. 2020.

BRASIL, M. M. A. Ministério do Meio Ambiente. 2015. Disponível em: <https://www.mma.gov.br/images/arquivos/biomas/mata_atlantica/Relatorio%20Final%20Atualizacao%20do%20Mapa%20de%20cobertura%20vegetal%20nativa%20da%20Mata%20Atlantica%201.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2019.

BRIGHENTI, T. M. et al. Calibração hierárquica do modelo Swat em uma bacia hidrográfica Catarinense. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Florianópolis, v. 21, n. 1, p. 53-64, 2016.

BROOKS, R. H.; COREY, T. Hydraulic properties of porous media. **Hydrology Papers**, Colorado, n. 3, p. 1 - 27, 1964.

BUDYKO, M. I. **Climate and life**. New York: Academic Press, 1974.

BYRNE, B.; GOLDBLATT, C. Radiative forcing at high concentrations of well-mixed greenhouse gases. **Geophysical Research Letters**, Victoria, v. 41, n. 1, p. 152-160, 2014.

CASAGRANDE, L. et al. Early flood warning in the Itajaí-Açu River basin using numerical weather forecasting and hydrological modeling. **Natural Hazards**, São José dos Campos, v. 88, n. 2, p. 741-757, 2017.

CAVALCANTI, I. F. A. et al. Global climatological features in a simulation using the CPTEC - COLA AGCM. **Journal of Climate**, Cachoeira Paulista, v. 15, n. 21, p. 2965-2988, 2002.

CHOU, S. C. et al. Evaluation of the Eta simulations nested in three global climate models. **American Journal of Climate Change**, Cachoeira Paulista, v. 3, n. 5, p. 438-454, 2014a.

CHOU, S. C. et al. Assessment of climate change over South America under RCP4.5 and 8.5 downscaling scenarios. *American Journal of Climate Change*, Cachoeira Paulista, v. 3, n. 5, p. 512-525, 2014b.

CHYLEK, P. et al. Observed and model simulated 20th century Arctic temperature variability: Canadian earth system model CanESM2. **Atmospheric Chemistry and Physics Discussions**, Los Alamos, v. 11, n. 8, p. 22893-22907, 2011.

COLLINS, W. J. et al. Evaluation of the HadGEM2 model. **Hadley Cent. Tech. Note**, Exeter, v. 74, p. 1 – 47, 2008.

CUARTAS, L. A. et al. Distributed hydrological modeling of a micro-scale rainforest watershed in Amazonia: model evaluation and advances in calibration using the new HAND terrain model. **Journal of Hydrology**, São José dos Campos, v. 462, p. 15-27, 2012.

CUNGE, J. A. On the subject of a flood propagation computation method (Muskingum method). **Journal of Hydraulic Research**, Grenoble, v. 7, n. 2, p. 205–230, 1969.

DERECZYNSKI, C. et al. Downscaling of climate extremes over South America–Part I: Model evaluation in the reference climate. **Weather and Climate Extremes**, Rio de Janeiro, p. 100273, 2020.

DUAN, Q. et al. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. **Water resources research**, Tucson, v. 28, n. 4, p. 1015-1031, 1992.

EK, M. B. et al. Implementation of Noah land surface model advances in the National Centers for Environmental Prediction operational mesoscale Eta model. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, Suitland, v. 108, n. D22, 2003.

FALCK, A. S. **Avaliação da incerteza nas estimativas de precipitação por satélite e sua propagação no Modelo Hidrológico Distribuído MHD-INPE**. 2015. 153 p. Tese (Doutorado) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2015.

FALCK, A. S. et al. Propagation of satellite precipitation uncertainties through a distributed hydrologic model: A case study in the Tocantins-Araguaia basin in Brazil. **Journal of Hydrology**, São José dos Campos, v. 527, p. 943-957, 2015.

FELS, S. B.; SCHWARZKOPF, M. D. The simplified exchange approximation: A new method for radiative transfer calculations. **Journal of the Atmospheric Sciences**, Princeton, v. 32, n. 7, p. 1475-1488, 1975.

GASH, J. H. C.; LLOYD, C. R.; LACHAUD, G. Estimating sparse forest rainfall interception with an analytical model. **Journal of Hydrology**, Toulouse, v. 170, p. 79-86, 1995.

GOMES, N. M. et al. Aplicabilidade do LISEM (Limburg Soil Erosion) para simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica tropical. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Lavras, v. 32, n. 6, p. 2483-2492, 2008.

GU, H. et al. Projected changes in hydrological extremes in the Yangtze River Basin with an ensemble of regional climate simulations. **Water**, Nanjing, v. 10, n. 9, p. 1279, 2018.

GUPTA, H. V. et al. Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. **Journal of Hydrologic Engineering**, Tucson, v. 4, n. 2, p. 135-143, 1999.

GUPTA, H. V. et al. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: implications for improving hydrological modeling. **Journal of hydrology**, Tucson, v. 377, p. 80-91, 2009.

IORGULESCU, I.; MUSY, A. Generalization of Topmodel for a power law transmissivity profile. **Hydrological Processes**, Lausanne, v. 11, n. 9, p. 1353–1355, 1997.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). 2019. Disponível em: < <https://www.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 01 fev. 2019.

INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Climate change 2007: the physical science basis. Cambridge: Cambridge University, 2007.

INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Climate change 2013: the physical science basis. Cambridge: Cambridge University, 2013.

JANJIC, Z. I. The step-mountain coordinate model: further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. **Monthly Weather Review**, Washington, v. 122, n. 5, p. 927-945, 1994.

JARVIS, N. J. A simple empirical model of root water uptake. **Journal of Hydrology**, Uppsala Sweden, v. 107, p. 57-72, 1989.

JONES, C. D. et al. The HadGEM2-ES implementation of CMIP5 centennial simulations. **Geoscientific Model Development**, Exeter, v. 4, p. 543-570, 2011.

KARLSSON, I. B. et al. Combined effects of climate models, hydrological model structures and land use scenarios on hydrological impacts of climate change. **Journal of Hydrology**, Copenhagen, v. 535, p. 301-317, 2016.

LACIS, A. A.; HANSEN, J. A parameterization for the absorption of solar radiation in the earth's atmosphere. **Journal of the atmospheric sciences**, New York, v. 31, n. 1, p. 118-133, 1974.

LELIS, T. A. et al. Impactos causados pelas mudanças climáticas nos processos erosivos de uma bacia hidrográfica: Simulação de cenários. **Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, Taubaté, v. 6, n. 2, p. 282-294, 2011.

LEY, R. et al. Catchment classification by runoff behaviour with self-organizing maps (SOM). **Hydrology & Earth System Sciences**, Trier, v. 15, n. 9, p. 2947 - 2962, 2011.

LOPES, L. G. et al. Projeções de descargas extremas sob impactos das mudanças climáticas na região Amazônica. **Revista Brasileira de Cartografia**, Cachoeira Paulista, v. 69, n. 1, p. 209 - 227, 2017.

LUCAS, E. W. M. et al. Modelagem hidrológica determinística e estocástica aplicada à região hidrográfica do Xingu-Pará. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Brasília, v. 24, n. 3, p. 308-322, 2009.

LYRA, A. et al. Projections of climate change impacts on central America tropical rainforest. **Climatic Change**, Cachoeira Paulista, v. 141, n. 1, p. 93-105, 2017.

LYRA, A. et al. Climate change projections over three metropolitan regions in Southeast Brazil using the non-hydrostatic Eta regional climate model at 5-km resolution. **Theoretical and applied climatology**, Cachoeira Paulista, v. 132, n. 1-2, p. 663-682, 2018.

MACHADO, L. H. R. et al. Impacto da utilização de previsões “defasadas” no sistema de previsão de tempo por conjunto do CPTEC/INPE. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Cachoeira Paulista, v. 25, n. 1, p. 54-69, 2010.

MARENGO, J. et al. A seca e a crise hídrica de 2014-2015 em São Paulo. **Revista USP**, São Paulo, v. 206, n. 1, p. 31-44, 2015.

MARTINS, M. A.; TOMASELLA, J.; DIAS, C. G. Maize yield under a changing climate in the Brazilian Northeast: Impacts and adaptation. **Agricultural Water Management**, Cachoeira Paulista, v. 216, p. 339-350, 2019.

MARTINS, M. A. et al. Improving drought management in the Brazilian semiarid through crop forecasting. **Agricultural Systems**, Cachoeira Paulista, v. 160, p. 21-30, 2018.

MEINSHAUSEN, M. et al. The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. **Climatic change**, Potsdam, v. 109, n. 1-2, p. 213, 2011.

MELO, P. A. **Desempenho de modelos hidrológicos em uma bacia hidrográfica de cabeceira**. 2020. 90 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2020.

MELLO, C. R. de et al. Sea surface temperature (SST) and rainfall erosivity in the Upper Grande River Basin, Southeast Brazil. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 36, n. 1, p. 53-59, 2012.

MELLO, C. R. et al. Assessing the climate change impacts on the rainfall erosivity throughout the twenty-first century in the Grande River Basin (GRB) headwaters, Southeastern Brazil. **Environmental Earth Sciences**, Lavras, v. 73, n. 12, p. 8683-8698, 2015.

MELLO, C. R. de et al. Agricultural watershed modeling: a review for hydrology and soil erosion processes. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 40, n. 1, p. 7-25, 2016.

MELLO, C. R. et al. Water balance in a neotropical forest catchment of southeastern Brazil. **Catena**, Lavras, v. 173, p. 9-21, 2019.

MESINGER, F. et al. The step-mountain coordinate: Model description and performance for cases of Alpine lee cyclogenesis and for a case of an Appalachian redevelopment. **Monthly Weather Review**, Princeton, v. 116, n. 7, p. 1493-1518, 1988.

MESINGER, F. et al. An upgraded version of the Eta Model. **Meteorology and Atmospheric Physics**, Belgrade, v. 116, p. 63-79, 2012.

MOHOR, G. S. et al. Exploratory analyses for the assessment of climate change impacts on the energy production in an Amazon run-of-river hydropower plant. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, Cachoeira Paulista, v. 4, p. 41-59, 2015.

MOHOR, G. S.; MENDIONDO, E. M. Economic indicators of hydrologic drought insurance under water demand and climate change scenarios in a Brazilian context. **Ecological Economics**, São Carlos, v. 140, p. 66-78, 2017.

MONTEITH, J. L. Evaporation and surface temperature. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 107, p. 1-27, 1981.

MOREIRA, L. L. et al. Parâmetros pedológicos para estimativa de vazões em bacias hidrográficas. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Porto Alegre, v. 14, n. 1, p. 78-84, 2019.

MORIASI, D. N. et al. Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria. **Transactions of the ASABE**, El Reno, v. 58, n. 6, p. 1763-1785, 2015.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. **Journal of hydrology**, Berks, v. 10, n. 3, p. 282-290, 1970.

NEGRÃO, A. C. et al. **Modelo hidrológico distribuído MHD-INPE: Manual de implementação**. São José dos Campos: INPE, 2016. Disponível em: <<http://urlib.net/rep/8JMKD3MGP3W34P/3LD4EQ8>>. Acesso em: 25 fev. 2019.

NETO, J. O. M. et al. Simulação hidrológica escalar com o modelo SWAT. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Lavras, v. 19, n. 1, p. 177-188, 2014.

OLIVEIRA, K. D.; TOMASELLA, J.; SANCHES, L. D. Spatial-temporal analysis of the climatic and anthropogenic influences on runoff in the Jucu River Basin, Southeastern Brazil. **Land Degradation & Development**, São José dos Campos, v. 30, n. 17, p. 2073-2087, 2019.

OLIVEIRA, V. A. et al. 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**, Lavras, v. 37, n. 15, p. 5005-5023, 2017.

PAZ, A. R.; COLLISCHONN, W. River reach length and slope estimates for largescale hydrological models based on a relatively high-resolution digital elevation model. **Journal of Hydrology**, Porto Alegre, v. 343, n. 3-4, p. 127 - 139, 2007.

PELEGRINO, M. H. P. et al. Mapping soils in two watersheds using legacy data and extrapolation for similar surrounding areas. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 40, n. 5, p. 534-546, 2016.

PONTES, L. M. et al. Avaliação de modelo de balanço hídrico com base na estimativa da recarga potencial. **Revista Ambiente & Água**, Lavras, v. 11, n. 4, p. 915-928, 2016.

RENNÓ, C. D. et al. HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. **Remote Sensing of Environment**, São José dos Campos, v. 112, n. 9, p. 3469-3481, 2008.

RODRIGUEZ, D. A. **Impactos dos padrões espaciais da vegetação nas variáveis atmosférica e terrestre do ciclo hidrológico em bacia de floresta amazônica**. 2011. 208 p. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2011.

RODRIGUEZ, D. A., TOMASELLA, J. On the ability of large-scale hydrological models to simulate land use and land cover change impacts in Amazonian basins. **Hydrological Sciences Journal**, Cachoeira Paulista, v. 61, n. 10, p. 1831-1846, 2016.

SALES, D. C. et al. Projeções de mudanças na precipitação e temperatura no Nordeste brasileiro utilizando a técnica de Downscaling dinâmico. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Fortaleza, v. 30, n. 4, p. 435-456, 2015.

SAMPAIO, G. et al. Evolução dos Modelos Climáticos e de Previsão de Tempo e Clima. **Revista USP**, São Paulo, n. 103, p. 41-54, 2014.

SANTOS, C. A. S. et al. Using a Hydrologic Model to Assess the Performance of Regional Climate Models in a Semi-Arid Watershed in Brazil. **Water**, Vitória da Conquista, v. 11, n. 1, p. 170, 2019.

SILVA, J. R. I. et al. Aplicação do método de Budyko para modelagem do balanço hídrico no semiárido brasileiro. **Scientia Plena**, Serra Talhada, v. 13, n. 10, p. 1-11, 2017.

SILVA, R. D. et al. Estimativa da umidade do solo usando o modelo hidrológico distribuído MHD-INPE: estudo de caso na Bacia do Purus. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto-SBSR, XVII, João Pessoa, PB. **Anais eletrônicos...** São José dos Campos, SP: INPE, p. 4292-4299, 2015.

SIQUEIRA JÚNIOR, J. L.; TOMASELLA, J.; RODRIGUEZ, D. A. **Climatic Change Springer**, Cachoeira Paulista, v. 129, n. 1-2, p. 117-129, 2015.

TEUTSCHBEIN, C.; SEIBERT, J. Regional climate models for hydrological impact studies at the catchment scale: a review of recent modeling strategies. **Geography Compass**, Stockholm, v. 4, n. 7, p. 834-860, 2010.

TEUTSCHBEIN, C.; SEIBERT, J. Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. **Journal of Hydrology**, Stockholm, v. 456, p. 12-29, 2012.

TOMASELLA, J. et al. Probabilistic flood forecasting in the Doce Basin in Brazil: Effects of the basin scale and orientation and the spatial distribution of rainfall. **Journal of Flood Risk Management**, Cachoeira Paulista, p. 1 -15, 2018.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. Porto Alegre: Editora Universitária UFRGS, 1998.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA). Soil Texture Calculator. Disponível em: < <https://www.nrcs.usda.gov> >. Acesso em: 08 abr. 2019.

VIOLA, M. R. et al. Applicability of the LASH model for hydrological simulation of the Grande River Basin, Brazil. **Journal of Hydrologic Engineering**, Lavras, v. 18, n. 12, p. 1639-1652, 2013.

VIOLA, M. R. et al. Assessing climate change impacts on Upper Grande River Basin hydrology, Southeast Brazil. **International Journal of Climatology**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1054-1068, 2015.

VON RANDOW, R. C. S. et al. Response of the river discharge in the Tocantins River Basin, Brazil, to environmental changes and the associated effects on the energy potential. **Regional Environmental Change**, São José dos Campos, v. 19, n. 1, p. 193-204, 2019.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 4 ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014.

WATANABE, M. et al. Improved climate simulation by MIROC5: mean states, variability, and climate sensitivity. **Journal of Climate**, Kashiwa, v. 23, n. 23, p. 6312-6335, 2010.

YAPO, P. O. et al. Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models: sensitivity to calibration data. **Journal of Hydrology**, Tucson, v. 181, n. 1-4, p. 23-48, 1996.

ZHAO, Q; CARR, F. H. A prognostic cloud scheme for operational NWP models. **Monthly Weather Review**, Norman, v. 125, n. 8, p. 1931-1953, 1997.

ZHAO, R. J. The Xinanjiang model applied in China. **Journal of Hydrology**, Nanjing, v. 135, p. 371-381, 1992.

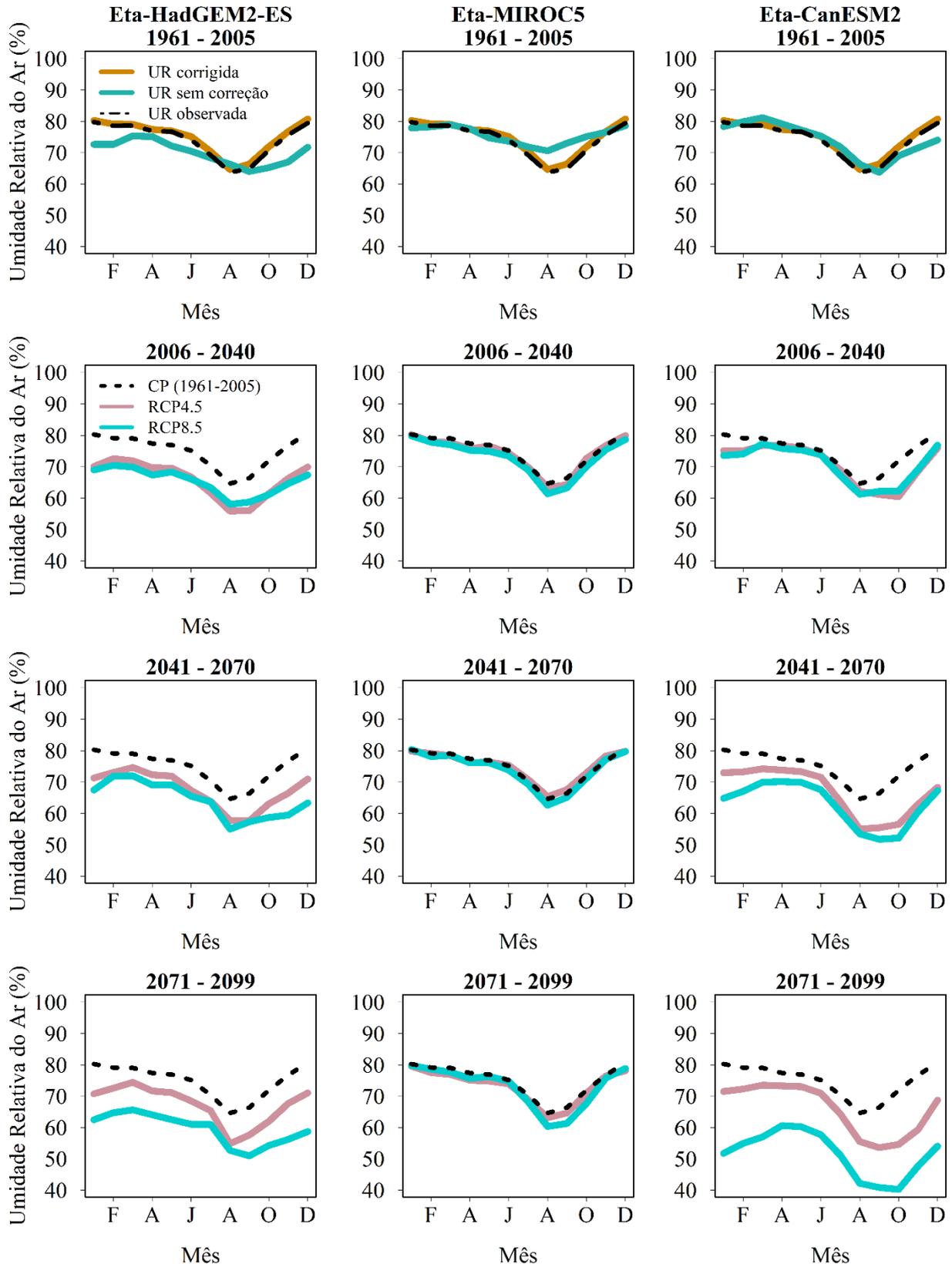
ZHAO, R. J. et al. The Xinanjiang model. In: Singh, V.P. (Ed.) Computer Models of Watershed Hydrology. **Highlands Ranch: Water Resources Publication**, p. 215-232, 1995.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Projeções climáticas corrigidas requeridas pelo MHD-INPE.

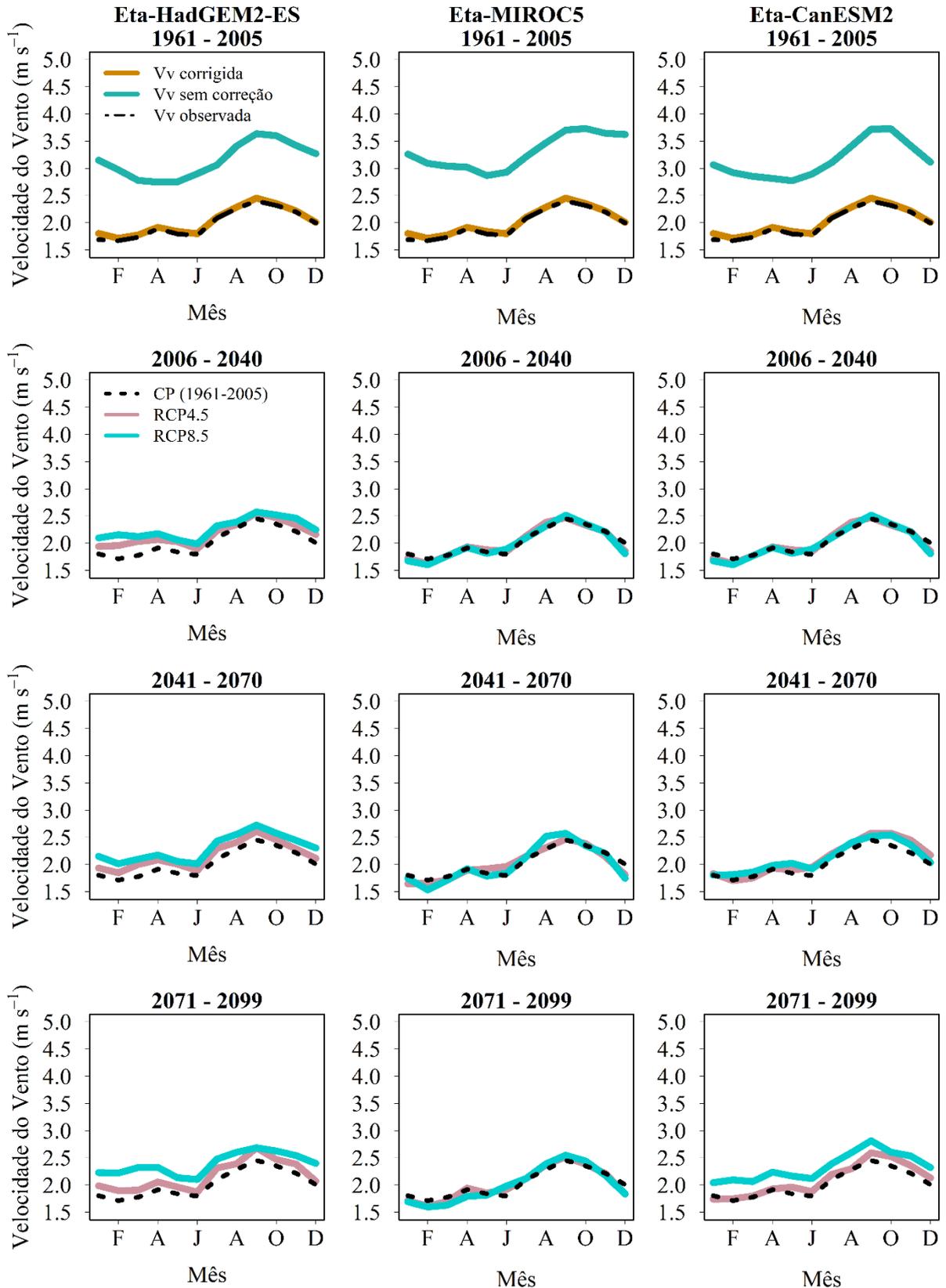
Conforme destacado ao longo do texto, as projeções climáticas do modelo Eta, referentes as variáveis de entrada requeridas pelo MHD-INPE - precipitação, temperatura média, umidade relativa do ar, velocidade do vento, radiação global e pressão a superfície - foram corrigidas utilizando os dados meteorológicos da estação automática de Lavras, pertencente ao INMET. No tópico Resultados e Discussão, foram discutidas as correções da precipitação e da temperatura média. Para fins de demonstração, as demais variáveis corrigidas estão explicitadas na Figura 26, 27, 28 e 29.

Figura 26 - Umidade relativa do ar (UR) mensal observada (Lavras - INMET), umidade relativa do ar mensal sem correção e corrigida (BHRJ) para o clima presente (CP) (1961-2005). Na sequência, umidade relativa do ar mensal corrigida para o clima presente e cenários RCP4.5 e RCP8.5 (2006-2040, 2041-2070 e 2071-2099).



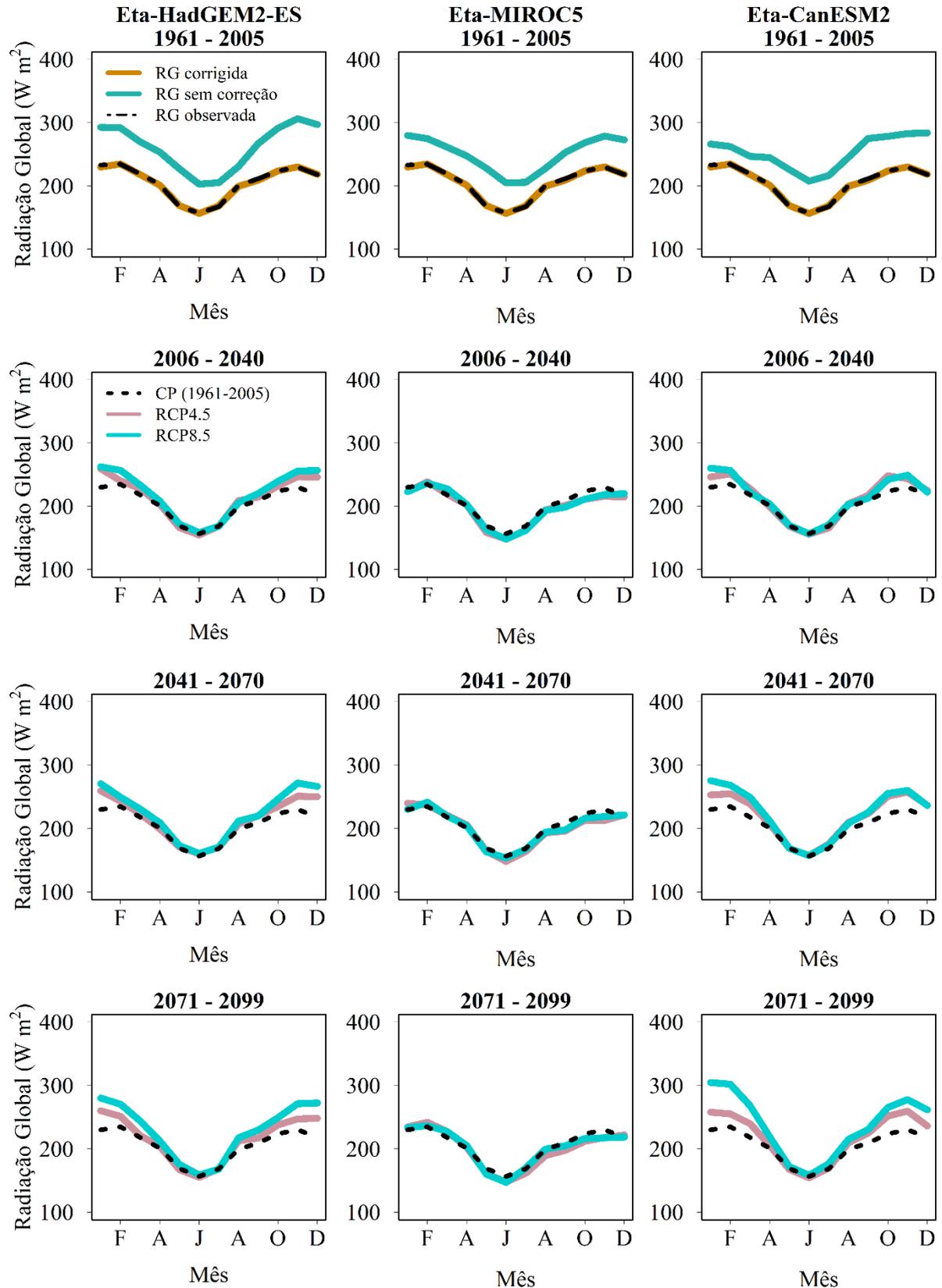
Fonte: Da autora (2020).

Figura 27 - Velocidade do vento (Vv) mensal observada (Lavras - INMET), velocidade do vento mensal sem correção e corrigida (BHRJ) para o clima presente (CP) (1961-2005). Na sequência, velocidade do vento mensal corrigida para o clima presente e cenários RCP4.5 e RCP8.5 (2006-2040, 2041-2070 e 2071-2099).



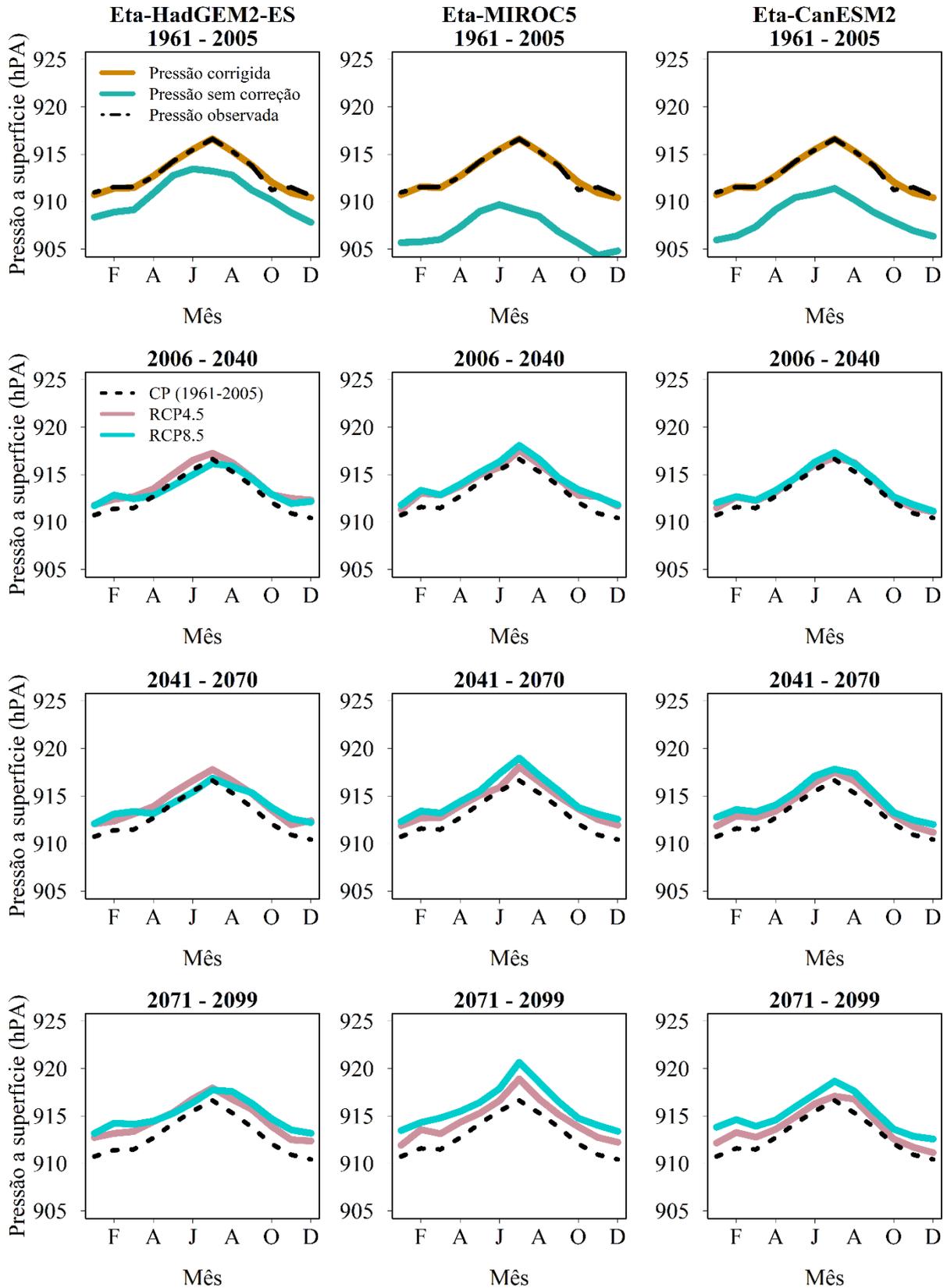
Fonte: Da autora (2020).

Figura 28 - Radiação global (RG) mensal observada (Lavras - INMET), radiação global mensal sem correção e corrigida (BHRJ) para o clima presente (CP) (1961-2005). Na sequência, radiação global mensal corrigida para o clima presente e cenários RCP4.5 e RCP8.5 (2006-2040, 2041-2070 e 2071-2099).



Fonte: Da autora (2020).

Figura 29 - Pressão a superfície (Pressão) mensal observada (Lavras - INMET), pressão a superfície mensal sem correção e corrigida (BHRJ) para o clima presente (CP) (1961-2005). Na sequência, pressão a superfície mensal corrigida para o clima presente e cenários RCP4.5 e RCP8.5 (2006-2040, 2041-2070 e 2071-2099).



Fonte: Da autora (2020).