

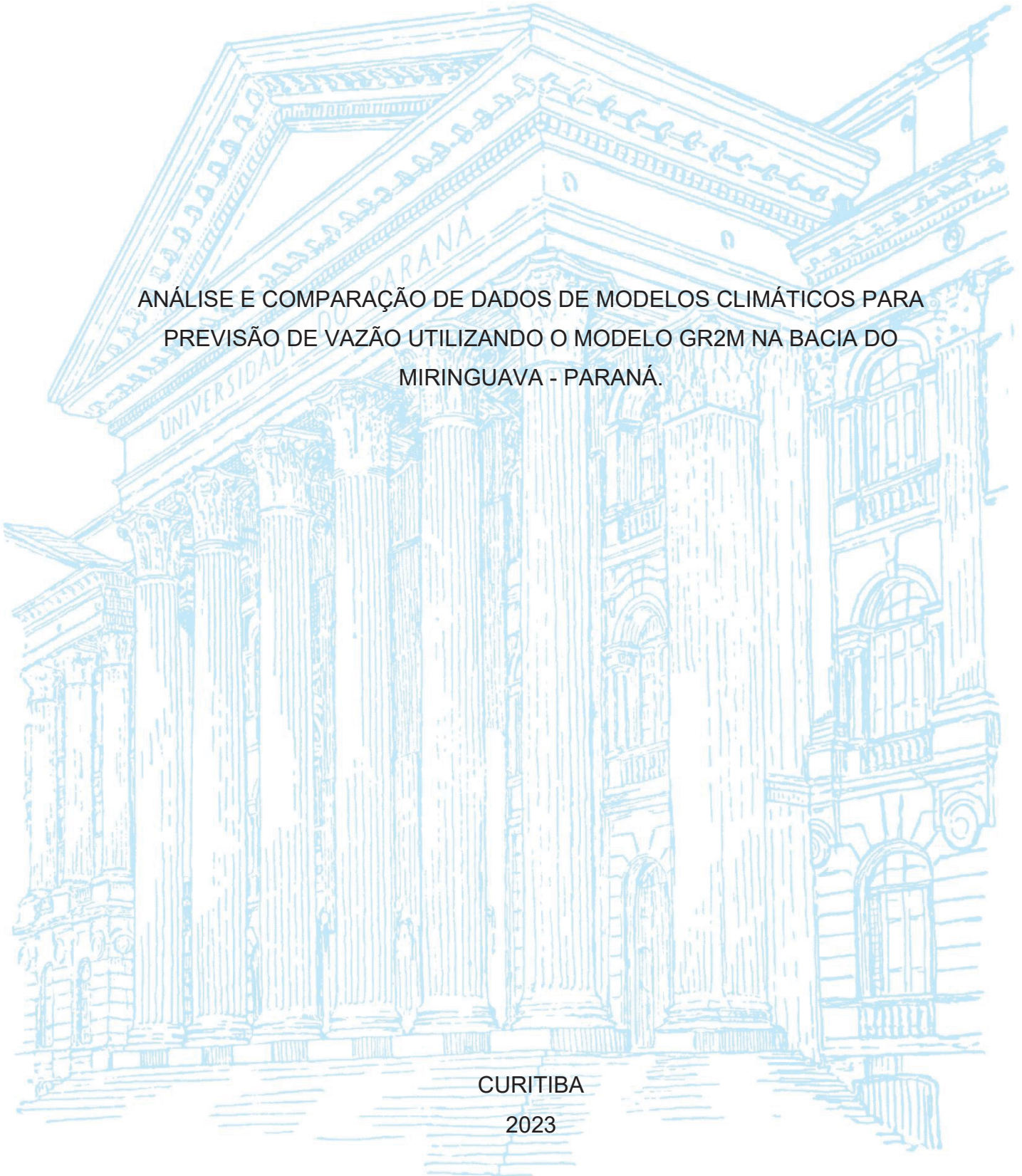
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MARIANA GARCIA GHIRELLI

ANÁLISE E COMPARAÇÃO DE DADOS DE MODELOS CLIMÁTICOS PARA  
PREVISÃO DE VAZÃO UTILIZANDO O MODELO GR2M NA BACIA DO  
MIRINGUAVA - PARANÁ.

CURITIBA

2023



MARIANA GARCIA GHIRELLI

ANÁLISE E COMPARAÇÃO DE DADOS DE MODELOS CLIMÁTICOS PARA  
PREVISÃO DE VAZÃO UTILIZANDO O MODELO GR2M NA BACIA DO  
MIRINGUAVA - PARANÁ.

Dissertação de mestrado apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Emílio Graciliano Ferreira Mercuri

CURITIBA

2023

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Ghirelli, Mariana Garcia

Análise e comparação de dados de modelos climáticos para previsão de vazão utilizando o modelo GR2M na bacia do Miringuava – Paraná / Mariana Garcia Ghirelli. – Curitiba, 2023.

1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental.

Orientador: Emílio Graciliano Ferreira Mercuri

1. Hidrologia. 2. Balanço hidrológico. 3. Vazão – Rios. 4. Miringuava, Rio, Bacia (PR). I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. III. Mercuri, Emílio Graciliano Ferreira. IV. Título.



## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA AMBIENTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **MARIANA GARCIA GHIRELLI** intitulada: **Análise e comparação de dados de modelos climáticos para previsão de vazão utilizando o modelo GR2M na bacia do Miringuava - Paraná**, sob orientação do Prof. Dr. EMILIO GRACILIANO FERREIRA MERCURI, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestra está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 01 de Dezembro de 2023.

Assinatura Eletrônica

04/12/2023 11:51:36.0

EMILIO GRACILIANO FERREIRA MERCURI

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

07/12/2023 12:39:52.0

RODRIGO MARCOS DE SOUZA

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

04/12/2023 08:47:36.0

CAMILA BERTOLETTI CARPENEDO

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Tempos difíceis nos aguardam e em breve teremos que escolher entre o que é certo  
e o que é fácil. - Alvo Dumbledore  
ROWLING. J. K., Harry Potter e o Cálice de Fogo.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por ser consolador, paciente e misericordioso, sem Ele nada seria possível.

“Deus é o mesmo ontem, hoje e para sempre, mas nós não somos. A cada dia, temos o desafio de recorrer ao poder da Expição para que possamos realmente mudar, tornando-nos mais semelhantes a Cristo, e de qualificar-nos para a dádiva da exaltação e para viver eternamente com Deus, Jesus Cristo e nossa família. Por esses poderes, privilégios e dádivas do evangelho, graças damos a Deus!” – Presidente Russel M. Nelson.

Ao meu orientador, professor Emílio Graciliano Ferreira Mercuri, pela sua paciência e por acreditar no meu potencial, agradeço por todo o tempo despendido, pelo conhecimento compartilhado e por me orientar a ter foco e persistência.

À minha família, que proporciona o lar para onde eu posso voltar em todos os momentos.

Ao meu marido Roberto Lukas, por ser meu verdadeiro companheiro eterno e me apoiar em todas as circunstâncias, seja facilitando todas as atividades da casa para que eu pudesse me dedicar aos estudos, proporcionando momentos de diversão ou comprando muito energético para que aguentasse as noites em claro.

Ao meu filho bichológico Alfredo, por ser meu companheiro durante os estudos e fornecer os lambeijos e abraços mais puros desse mundo.

Aos meus amigos, por garantirem as risadas nos momentos de tensão e me incentivarem sempre.

À Universidade Federal do Paraná, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental e aos professores, por permitirem que tivesse acesso ao ensino de qualidade.

E por fim, mas não menos importante, aos membros da banca por despenderem seu tempo e conhecimento.

## RESUMO

Mudanças climáticas perturbam o regime hidrológico, ocasionando aumento ou diminuição da vazão dos rios. Este fato somado a preocupação recente com a demanda hídrica devido a um período longo de seca na Região Metropolitana de Curitiba corrobora para o interesse em se compreender o efeito das mudanças climáticas em cenários futuros. Este estudo tem como objetivo geral comparar dados de Modelos Climáticos Globais aplicados a um modelo hidrológico para simulação de vazão futura em diferentes cenários, na bacia do Miringuava, no município de São José dos Pinhais, região metropolitana de Curitiba-PR, frente às mudanças climáticas, utilizando para isto o modelo hidrológico *Génie Rural à 2 paramètres Mensuel* (GR2M) e dados futuros dos modelos climáticos globais, do *Coupled Model Intercomparison Project 6* (CMIP6), ACCESS-CM2, CanESM5, EC-Earth3, IPSL-CM6A-LR, CAS-ESM2-0, CMCC-ESM2, KACE-1-0-G e MRI-ESM2-0. Inicialmente foram realizadas correções dos dados históricos de precipitação observados para o fechamento do balanço hídrico na bacia de estudo, em seguida o modelo GR2M foi calibrado com o dado de precipitação obtido pela média de Thiessen corrigido e o dado de evapotranspiração do sensor “*NASA’s Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*” (MODIS), sendo possível posteriormente simular projeções futuras de vazão mensal na bacia da área de estudo. A calibração do modelo é executada com o algoritmo *Differential Evolution* e o coeficiente de *Nash-Sutcliffe* foi utilizado para avaliar a performance do modelo em comparação com a vazão observada. Os cenários futuros utilizados seguem os definidos pelo Sexto Relatório de Avaliação do IPCC, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5 e o desempenho dos modelos será avaliado com a métrica estatística PBIAS. Para análise da disponibilidade hídrica foi estimada a vazão de referência  $Q_{95\%}$  mensal acumulada para os 4 cenários de projeção. Dentre 56 modelos climáticos selecionados, apenas 23 atenderam a todos os critérios de seleção e destes oito seguiram no estudo. Os resultados obtidos indicam que para a bacia de estudo o modelo climático com melhor desempenho é o EC-Earth3 e o de pior desempenho o KACE-1-0-G.

Palavras-chave: GR2M. Modelos Climáticos Globais. CMIP6. *Differential Evolution*. Balanço hídrico.

## ABSTRACT

Climate change disrupts the hydrological regime, leading to increased or decreased river flow. This, combined with recent concerns about water demand due to a prolonged drought in the Metropolitan Region of Curitiba, underscores the interest in understanding the effects of climate change in future scenarios. This study aims to compare data from Global Climate Models applied to a hydrological model for simulating future river flow in different scenarios in the Miringuava basin, located in the municipality of São José dos Pinhais, in the metropolitan region of Curitiba, Paraná, Brazil, in the face of climate change. The hydrological model used for this purpose is the "*Génie Rural à 2 paramètres Mensuel*" (GR2M), and future data from the global climate models of the Coupled Model Intercomparison Project 6 (CMIP6), including ACCESS-CM2, CanESM5, EC-Earth3, IPSL-CM6A-LR, CAS-ESM2-0, CMCC-ESM2, KACE-1-0-G, and MRI-ESM2-0. Initially, corrections were made to historical observed precipitation data to close the water balance in the study area, subsequently, the GR2M model was calibrated using the corrected Thiessen-weighted precipitation data and evapotranspiration data from the "NASA's Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer" (MODIS) sensor. This calibration allowed for the simulation of future monthly flow projections in the study area. Model calibration was performed using the Differential Evolution algorithm, and the Nash-Sutcliffe coefficient was used to evaluate the model's performance compared to observed flow. The future scenarios used follow those defined in the Sixth Assessment Report of the IPCC, including SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, and SSP5-8.5, and model performance will be assessed using the statistical metric PBIAS. To analyze water availability, the monthly cumulative reference flow  $Q_{95\%}$  was estimated for the four projection scenarios. Out of 56 selected climate models, only 23 met all selection criteria, and eight of these were included in the study. The results indicate that, for the study basin, the climate model with the best performance is EC-Earth3, while the worst-performing model is KACE-1-0-G.

Keywords: GR2M, Global Climate Models, CMIP6, Differential Evolution, Water Balance.



## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - DIAGRAMA DO MODELO GR2M .....	16
FIGURA 2 - RESUMO DA METODOLOGIA APLICADA.....	27
FIGURA 3 - ÁREA DE ESTUDO .....	29
FIGURA 4 - LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS E POLÍGONOS DE VORONOI .....	31
FIGURA 5 - GRÁFICOS DE PRECIPITAÇÃO DAS ESTAÇÕES UTILIZADAS NO ESTUDO (2000 - 2020).....	38
FIGURA 6 - GRÁFICOS DAS SÉRIES PREENCHIDAS DE PRECIPITAÇÃO .....	39
FIGURA 7 – GRÁFICOS PARA ANÁLISE DO BALANÇO HÍDRICO .....	40
FIGURA 8 - PRECIPITAÇÃO ANUAL ACUMULADA NA BACIA DO MIRINGUAVA POR SSP (2000-2100).....	41
FIGURA 9 - EVAPOTRANSPIRAÇÃO ANUAL ACUMULADA NA BACIA DO MIRINGUAVA POR SSP (2000-2100) .....	43
FIGURA 10 - GRÁFICO DE COMPARAÇÃO DA VAZÃO SIMULADA E VAZÃO OBSERVADA.....	44
FIGURA 11 - VAZÃO MÉDIA SIMULADA ANUAL NA BACIA DO MIRINGUAVA (1985-2100) POR SSP .....	45
FIGURA 12 - COMPARAÇÃO DE VALORES DE PBIAS POR SSP.....	46
FIGURA 13 - CURVAS DE PERMANÊNCIA (2016-2020) .....	49
FIGURA 14 - COMPARAÇÃO DE DADOS OBTIDOS DE VAZÃO SIMULADA E DADOS OBSERVADOS (2016-2020).....	50

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - MANACIAS E SISTEMAS DE CURITIBA E REGIÃO METROPOLITANA .....	11
TABELA 2 - DESCRIÇÃO E RELAÇÃO DE CENÁRIOS E CAMINHOS MODELADOS CONSIDERADOS NO AR6 .....	20
TABELA 3 - PROJEÇÃO DE MUDANÇAS NA TEMPERATURA MÉDIA DA SUPERFÍCIE GLOBAL .....	21
TABELA 4 - ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS UTILIZADAS NO ESTUDO.....	30
TABELA 5 - ORDEM DE PREENCHIMENTO DE DADOS PLUVIOMÉTRICOS .....	31
TABELA 6 - CONTABILIZAÇÃO DO NÚMERO DE FALHAS NAS SÉRIES DE DADOS DE PRECIPITAÇÃO ANTES E APÓS PREENCHIMENTO .....	32
TABELA 7 - ÁREA DOS POLÍGONOS DO MÉTODO DE THIESSEN PARA CADA ESTAÇÃO .....	32
TABELA 8 - DADOS DA ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA.....	33
TABELA 9 - CRITÉRIOS APLICADOS NA BASE DE DADOS CMIP6 .....	34
TABELA 10 – INTERVALOS DE CONSTANTES UTILIZADOS NO MODELO GR2M .....	35
TABELA 11 - PERÍODO DE AQUECIMENTO, CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO.....	35
TABELA 12 - CLASSIFICAÇÃO NSE .....	36
TABELA 13 - MODELOS CLIMÁTICOS GLOBAIS UTILIZADOS E REFERÊNCIAS	36
TABELA 14 - CLASSIFICAÇÃO PBIAS (%).....	37
TABELA 15 - PORCENTAGEM DE PREENCHIMENTO DE DADOS DE PRECIPITAÇÃO.....	39
TABELA 16 – VALORES OBTIDOS DE PBIAS - DADOS DE PRECIPITAÇÃO.....	42
TABELA 17 - AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DOS MCGs - DADOS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO.....	42
TABELA 18 - AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO MODELO HIDROLÓGICO COM PBIAS.....	45
TABELA 19 - VALOR DE 50% DA $Q_{95\%}$ (mm/mês).....	50

## LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento
AR5	Quinto Relatório de Avaliação
AR6	Sexto Relatório de Avaliação
CMIP	<i>Coupled Model Intercomparison Project</i>
COMEC	Coordenação da Região Metropolitana de Curitiba
COPEL	Companhia Paranaense de Energia
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
DEPV	Diretoria de Eletrônica e Proteção ao Vôo do Ministério da Aeronáutica
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
GGE	Gases de Efeito Estufa
GR2M	<i>Génie Rural à 2 paramètres au pas de temps Mensuel</i>
GRACE	<i>Gravity Recovery and Climate Experiment</i>
IAPAR	Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná
IAT	Instituto Água e Terra
IIASA	<i>International Institute for Applied Systems Analysis</i>
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPARDES	Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
JGCRI	<i>Pacific Northwest National Laboratory's Joint Global Change Research Institute</i>
MCG	Modelo Climático Global
MCR	Modelo Climático Regional
MODIS	<i>NASA's Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>
NCEP	<i>National Centers for Environmental Prediction</i>
NIES	<i>National Institute for Environmental Studies</i>
NUC	Núcleo Urbano Central
OMM	Organização Meteorológica Mundial
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
RCP	<i>Representative Concentration Pathways</i>
RFFSA	Rede Ferroviária Federal S/A
RMC	Região Metropolitana de Curitiba
SAIC	Sistema de Abastecimento Integrado de Curitiba e Região Metropolitana
SIMEPAR	Sistema Meteorológico do Paraná
SMAP	<i>Soil Moisture Active Passive</i>
SMOS	<i>Soil Moisture and Ocean Salinity</i>
SNIRH	Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos
SSP	<i>Shared Socioeconomic Pathway</i>
TRMM	<i>Tropical Rainfall Measuring Mission</i>
WCRP	<i>World Climate Research Programme</i>

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
1.1 OBJETIVOS .....	13
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>15</b>
2.1 BALANÇO HÍDRICO .....	15
2.2 MODELO GR2M .....	15
2.3 MÉTODO EVOLUÇÃO DIFERENCIAL .....	18
2.4 SEXTO RELATÓRIO DE AVALIAÇÃO (AR6) DO IPCC .....	18
2.5 MODELOS CLIMÁTICOS GLOBAIS (MCGS).....	23
2.6 DISPONIBILIDADE HÍDRICA.....	24
2.7 ESTUDOS SIMILARES .....	25
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>27</b>
3.1 ÁREA DE ESTUDO.....	28
3.2 CONJUNTO DE DADOS HISTÓRICOS.....	29
3.2.1 Precipitação.....	29
3.2.2 Evapotranspiração .....	32
3.2.3 Vazão .....	33
3.3 CORREÇÕES COM BASE NO BALANÇO HÍDRICO .....	33
3.4 CONJUNTO DE DADOS FUTUROS .....	34
3.5 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO.....	35
3.6 SIMULAÇÃO DAS SÉRIES FUTURAS USANDO DADOS DE MODELOS CLIMÁTICOS .....	36
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>38</b>
4.1 DADOS DE PRECIPITAÇÃO OBSERVADOS .....	38
4.2 BALANÇO HÍDRICO .....	40
4.3 COMPARAÇÃO DE DADOS PRETÉRITOS E PROJEÇÕES DO IPCC.....	41
4.4 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DE VAZÃO COM O GR2M.....	43
4.5 COMPARAÇÃO ENTRE MCGS.....	46
4.5 ANÁLISE DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA.....	48
<b>5 CONCLUSÃO</b> .....	<b>52</b>
<b>6 SUGESTÕES DE CONTINUIDADE</b> .....	<b>54</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>55</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente a Região Metropolitana de Curitiba (RMC) conta com o Sistema de Abastecimento Integrado de Curitiba e Região Metropolitana (SAIC), com uma produção de 9.495 l/s (SANEPAR, 2013), composto pelos sistemas indicados na TABELA 1:

TABELA 1 - MANACIAS E SISTEMAS DE CURITIBA E REGIÃO METROPOLITANA

MANANCIAIS E SISTEMAS		PRODUÇÃO
<b>Manancial do Altíssimo Iguaçu</b>	Sistema Iguaçu	3.300 l/s
	Sistema Iraí	2.600 l/s
<b>Sistema Passaúna</b>		1.800 l/s
<b>Sistema Miringuava</b>		900 l/s
<b>Aproveitamento de pequeno porte</b>	Sistema Rio Pequeno	200 l/s
	Sistema Despique	150 l/s
	Sistema Palmital	60 l/s
	Sistema Borda do Campo	20 l/s
<b>Mananciais subterrâneos</b>	Sistema Karst Colombo (Colombo e Fervidas)	155 l/s
	Sistema Almirante Tamandaré (Poços Almirante e Tranqueira)	205 l/s
	Sistema Capivari	90 l/s
	Sistema Campina Grande do Sul (Sede)	5 l/s
	Poço Araçatuba	7 l/s
	Sistema Poço São Marcos	3 l/s
<b>TOTAL</b>		9.495 l/s

Fonte: SANEPAR, 2013

O Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social (IPARDES) projeta uma população para a RMC em 2022 de 3.731.153 habitantes e de 4.179.308 habitantes em 2040 (IPARDES, 2022). A demanda de água tratada projetada pela SANEPAR, para o SAIC, para o ano de 2022 é de 9.035 l/s e para 2040 chega a 10.973 l/s (SANEPAR, 2013).

O Brasil contém o maior volume de água doce de qualquer nação do mundo (MELLO *et al.*, 2020) e a água é o recurso natural essencial para a manutenção da

vida no planeta (PERRY *et al.*, 2009). Portanto torna-se mandatório compreender o ciclo hidrológico e monitorar os seus constituintes. Todavia, globalmente está ocorrendo um declínio no número de estações de monitoramento de precipitação e vazão (LORENZ *et al.*, 2014), que ainda fornecem as únicas observações diretas dos componentes do ciclo da água terrestre. A situação é agravada pela pouca quantidade de dados de evapotranspiração e mudanças no armazenamento de água no solo, que, junto com precipitação e vazão, formam os principais componentes do ciclo hidrológico em grande escala.

Existem medições realizadas por equipamentos instalados em satélites que fornecem quase todos os componentes do ciclo hidrológico global, exemplos: precipitação da *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM; KUMMEROW *et al.* 2000), mudanças no armazenamento de água da *Gravity Recovery and Climate Experiment* (GRACE; SCHMIDT *et al.* 2008), escoamento de altimetria de satélite e radar (ALSDORF *et al.* 2007), umidade do solo do satélite *Soil Moisture and Ocean Salinity* (SMOS) (KERR *et al.* 2010) ou o satélite *Soil Moisture Active Passive* (SMAP) (ENTEKHABI *et al.* 2010), e uma série de variáveis relativas ao ciclo hidrológico do Aqua (PARKINSON 2003). As observações espaciais trazem consigo as vantagens de cobertura global e precisão homogênea, mas com resoluções espaciais e temporais limitadas.

Modelos hidrológicos são frequentemente utilizados pois os registros fluviométricos disponíveis são geralmente limitados. A partir dos dados de chuva e evapotranspiração, diferentes modelos podem prever variáveis hidrológicas a serem utilizadas em projetos de irrigação, barramentos ou análise de inundação (CHOW *et al.*, 1988; HARLAN *et al.*, 2010). Entretanto, nem sempre é realizada uma verificação se os dados ou o modelo estão respeitando o balanço hídrico na escala da bacia hidrográfica, ou seja, se a variação da quantidade de água armazenada na bacia é igual à entrada de precipitação menos a saída por vazão e evapotranspiração (BRUTSAERT, 2005).

Medições pontuais de precipitação são geralmente usadas para calcular precipitações médias na escala da bacia hidrográfica. Entretanto, diversos estudos apontam que a utilização de pluviômetros pode gerar erros de submedição de precipitação, tanto da neve (precipitação nival) quanto da chuva (precipitação líquida), principalmente devido ao efeito do vento (BRUTSAERT, 2005). Legates e DeLiberty

(1993) e Duchon e Essenberg (2001) afirmam que o efeito de submedição é menor sobre a precipitação líquida, com perda de medição em torno de 5%.

Autores e relatórios do IPCC têm ressaltado que as águas serão fortemente afetadas pelas mudanças climáticas (IPCC, 2021; MMA, 2016; ANA, 2016). Para Conway (2013), a incerteza é particularmente alta quanto aos padrões futuros de precipitação, em que a precipitação pode oscilar ao longo de décadas, induzindo períodos úmidos e secos no mesmo local. Esta incerteza age fortemente sobre a pesquisa e abordagens práticas para a adaptação no setor hídrico, pois quebram um paradigma básico da gestão das águas: a confiança em observações do passado para representar as condições atuais e futuras. Mesmo com grande incerteza, os efeitos das mudanças climáticas afetarão todas as dimensões da segurança hídrica, sobretudo a frequência e a intensidade de inundações e secas (FORMIGA-JOHNSSON e BRITTO, 2020).

A fim de se analisar alterações e possíveis consequências das mudanças climáticas nos corpos hídricos, são utilizados como principal ferramenta os Modelos Climáticos Globais (MCGs), aptos para representar as complexas interações entre o oceano, a atmosfera e a superfície terrestre (ROCHA et al., 2018), capazes de fazer projeções futuras de variáveis meteorológicas, como precipitação, temperatura, radiação, umidade do ar, entre outros. O uso de MCGs é amplamente reconhecido (ALMAGRO, 2020) através do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados (sigla em inglês CMIP). O projeto compreende novos conjuntos de experimentos de modelos climáticos, que são coordenados pelo Programa Mundial de Pesquisa Climática, o WCRP (World Climate Research Programme) e incluem mais de 50 MCGs complexos (KNUTTI e SEDLÁČEK, 2012; TAYLOR *et al.*, 2012).

## 1.1 OBJETIVOS

Este estudo tem como objetivo geral comparar dados de Modelos Climáticos Globais aplicados a um modelo hidrológico para simulação de vazão futura em diferentes cenários, na bacia do Miringuava, no município de São José dos Pinhais, região metropolitana de Curitiba-PR, frente às mudanças climáticas, utilizando para isto o modelo chuva-vazão GR2M e os modelos climáticos globais do *Coupled Model Intercomparison Project 6* (CMIP6), ACCESS-CM2, CanESM5, EC-Earth3, IPSL-CM6A-LR, CAS-ESM2-0, CMCC-ESM2, KACE-1-0-G e MRI-ESM2-0.

Como objetivo específico pretende-se:

- 1) avaliar o efeito das correções dos dados de precipitação baseados no método do balanço hídrico para simulação de vazão pretérita na bacia selecionada;
- 2) Avaliar o desempenho, na região de estudo, dos modelos climáticos globais selecionados.



## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 BALANÇO HÍDRICO

Segundo Beckie (2005), a bacia hidrográfica pode ser representada como um volume de controle com fluxos de entrada e saída, como evapotranspiração, vazão e precipitação. Desta forma, o balanço de massa (hídrico) deste sistema pode ser representado na forma:

$$\frac{dS}{dt} = P - E - Q. \quad [1]$$

Sendo que S é o armazenamento de água na bacia, P é a taxa de precipitação, E é a taxa de evapotranspiração e Q é a vazão na exutória. Para longos períodos de tempo, por exemplo na escala de anos, considera-se que a variação no armazenamento anual é desprezível em comparação com a precipitação, evapotranspiração e vazão anuais, e essa equação pode ser escrita como  $P = E + Q$  (BRUTSAERT, 2005).

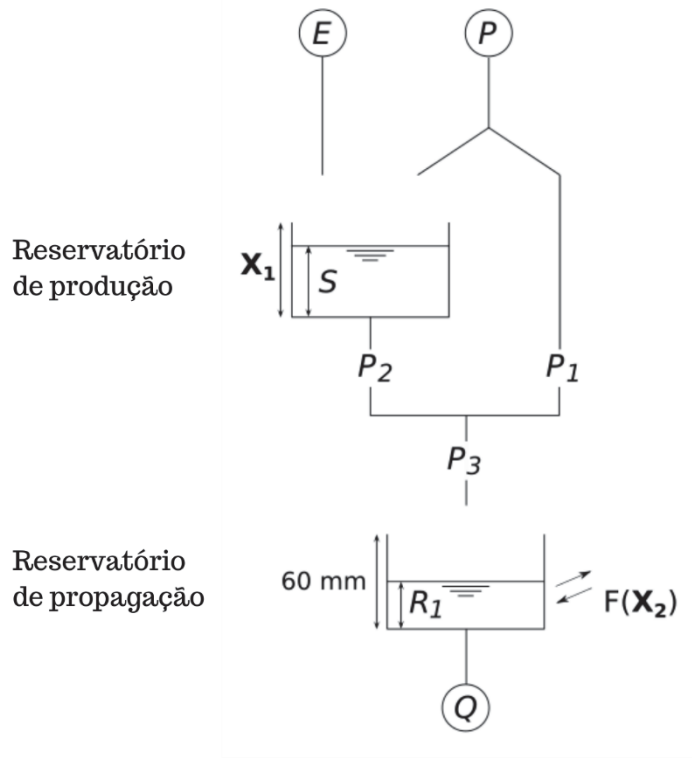
### 2.2 MODELO GR2M

O modelo chuva-vazão GR2M (*Génie Rural à 2 paramètres au pas de temps Mensuel*) foi desenvolvido no Cemagref (*Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture*) no final da década de 1980, objetivando sua aplicação na área de recursos hídricos e baixos níveis de água. O modelo passou por diversas versões de melhoria de desempenho, propostas por Kabouya (1990), Kabouya e Michel (1991), Makhlouf (1994), Makhlouf e Michel (1994), Mouelhi (2003) e Mouelhi et al. (2006), sendo a última a versão utilizada neste estudo.

Trata-se de um modelo agregado de simulação de vazões mensais que transforma a precipitação em escoamento por meio de funções de produção e transferência. Possui dois reservatórios - solo e água gravitacional - e representa processos hidrológicos como escoamento superficial, evapotranspiração, percolação profunda e armazenamento. A FIGURA 1 ilustra sua estrutura com os componentes principais, como precipitação (P), escoamento superficial ( $P_1$ ), evapotranspiração (E), percolação profunda ( $P_2$ ), armazenamentos iniciais (S e R) e vazão na saída (Q). As

capacidades máximas são  $X_1$  para o reservatório de solo e 60 mm para o gravitacional (CABRERA, 2013).

FIGURA 1 - DIAGRAMA DO MODELO GR2M



Fonte: Adaptado de Mouelhi *et al.* (2006)

No modelo GR2M, a função de produção depende de um armazenamento de umidade do solo. Dada uma precipitação  $P$ , o nível  $S$  no reservatório torna-se  $S_1$  e é definido por:

$$S_1 = \frac{S + X_1 \varphi}{1 + \varphi \frac{S}{X_1}} \quad [2]$$

$$\varphi = \tan\left(\frac{P}{X_1}\right) \quad [3]$$

O parâmetro  $X_1$ , a capacidade máxima do reservatório, é positivo e é dado em mm.

O excesso de precipitação  $P_1$  é dado por:

$$P_1 = P + S - S_1 \quad [4]$$

Dada a evapotranspiração potencial  $E$ , o nível  $S_1$  torna-se  $S_2$ :

$$S_2 = \frac{S_1(1 - \psi)}{1 + \psi \left(1 - \frac{S_1}{X_1}\right)} \quad [5]$$

$$\psi = \tan\left(\frac{E}{X_1}\right) \quad [6]$$

O reservatório de produção então se esvazia com uma percolação  $P_2$  e seu nível  $S$ , pronto para os cálculos do mês seguinte, dado por:

$$S = \frac{S_3}{\left[1 + \left(\frac{S_3}{X_1}\right)^3\right]^{1/3}} \quad [7]$$

$$P_2 = S_2 - S \quad [8]$$

A precipitação total  $P_3$  que atinge o reservatório de propagação é dada por:

$$P_3 = P_1 + P_2 \quad [9]$$

O nível  $R$  no armazenamento de roteamento torna-se então  $R_1$ :

$$R_1 = R + P_3 \quad [10]$$

Um termo de troca de água é então calculado:

$$F = (X_2 - 1)R_1 \quad [11]$$

O parâmetro  $X_2$  é positivo e não tem dimensão. O nível no reservatório se torna:

$$R_2 = X_2R_1 \quad [12]$$

O reservatório, com capacidade fixa igual a 60 mm, esvazia seguindo uma função quadrática. A vazão é dada por:

$$Q = \left(\frac{R_3^3}{R_3 + 60}\right) \quad [13]$$

O modelo possui dois parâmetros para otimizar durante sua calibração. Os parâmetros são:  $X_1$ , que reflete a capacidade máxima do reservatório de produção (mm), e  $X_2$ , referente ao coeficiente de troca (adimensional).

Tem se enfatizado na literatura que o modelo GR2M apresenta queda de desempenho na validação (MENDEZ *et al.*, 2022, TOPALOVIC, Ž.; TODOROVIC, A.; PLAVŠIĆ, J., 2020, CAMPBELL *et al.*, 2011 e MAGAÑA, V.; CAETANO, E., 2005) sendo relacionada à dependência de condições hidroclimáticas e sazonalidades específicas do período selecionado para a calibração/validação, fragilidade na determinação de parâmetros e mudanças no uso do solo e erros de aquisição de dados (MENDEZ *et al.*, 2022).

Modelos hidrológicos em geral possuem a etapa de aquecimento. O processo de aquecimento de um modelo é uma etapa de adaptação que viabiliza que o modelo alcance um estado otimizado. Nesse período, a água retida internamente (expressa, por exemplo, pela variável de umidade do solo) transita de sua condição inicial para um estado ideal. Ao atingir esse estado ótimo, a representação do modelo se torna mais realista (ou estável), e as variáveis hidrológicas simuladas passam a se alinhar de maneira mais precisa com as observações realizadas (ALCANTARA, 2018).

O modelo da família GR, com passo de tempo diário, GR4J (em Francês, *modèle du Génie Rural à 4 paramètres Journalier*) já foi utilizado em estudos na região do estado do Paraná (KUANA, 2022, GHIRELLI, M. G. e MERCURI, E. G. F., 2023) onde se obteve bons resultados unido a facilidade de utilização do modelo, por esse motivo se optou pelo uso do modelo neste estudo.

### 2.3 MÉTODO EVOLUÇÃO DIFERENCIAL

O método *Differential Evolution* (DE) é um algoritmo de otimização (FEOKTISTOV, 2006) proposto por Storn e Price, em 1997, se caracteriza por ser um método heurístico, que não usa derivadas, com o intuito de solucionar problemas de otimização contínua.

Cheng e Hwang (2001) citam como principais características do DE: ser um algoritmo de busca estocástica, originado dos mecanismos de seleção natural; ser de simples e fácil entendimento, com poucos parâmetros de controle para conduzir à otimização; eficaz para solucionar problemas de otimização com função objetivo descontínua, pois não necessita de informações sobre derivadas da mesma; manipular um conjunto de soluções que utiliza diferentes regiões no espaço de busca, tornando o algoritmo robusto a mínimos locais; eficaz mesmo trabalhando com um conjunto pequeno; permite que variáveis sejam otimizadas como números reais, sem processamento extra.

### 2.4 SEXTO RELATÓRIO DE AVALIAÇÃO (AR6) DO IPCC

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, sigla em inglês para *Intergovernmental Panel on Climate Change*) é uma organização científico-política criada em 1988 no âmbito das Nações Unidas (ONU) pela iniciativa

do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) e da Organização Meteorológica Mundial (OMM).

O IPCC representa a maior autoridade mundial a respeito do aquecimento global, e tem sido a principal base para o estabelecimento de políticas climáticas mundiais e nacionais (VERDE, 2015).

Desde sua fundação o IPCC produziu seis grandes relatórios e alguns outros documentos. O primeiro relatório foi publicado em 1990 e o último em 2022.

O Sexto Relatório de Avaliação (AR6) substituiu os cenários definidos no AR5 por SSPs (sigla em inglês para *Shared Socioeconomic Pathway*):

- **SSP1-1.9 - Caminho Sustentável:** Este cenário representa um mundo em que as políticas globais e locais priorizam a sustentabilidade ambiental, a igualdade social e o desenvolvimento econômico. Há uma ênfase na cooperação internacional, eficiência energética, inovação tecnológica e mitigação das mudanças climáticas. O crescimento populacional diminui ao longo do tempo, e as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) são drasticamente reduzidas. Este cenário considera se chegar a emissões líquidas zero até 2050 (ROCHA, 2021).
- **SSP1-2.6 - Caminho Reformista:** Este cenário descreve um mundo em que políticas moderadas são implementadas para abordar as questões socioeconômicas e ambientais. O crescimento populacional também diminui, mas de forma mais lenta do que no SSP1-1.9. A mitigação das mudanças climáticas e a adoção de tecnologias de energia limpa ocorrem gradualmente. O cenário assim como o SSP1-1.9 considera chegar a emissões líquidas zero, porém a partir de 2080 (ROCHA, 2021).
- **SSP2-4.5 - Caminho Desigual:** Nesse cenário, as desigualdades econômicas e sociais são altas, com pouca cooperação global. O crescimento populacional é alto e as tecnologias limpas têm uma adoção limitada. Isso resulta em altas emissões de GEE e impactos significativos nas mudanças climáticas.
- **SSP3-7.0 - Caminho Desenvolvimento Sustentável sem Crescimento:** Esse cenário envolve uma mudança na prioridade econômica para o bem-estar humano e a sustentabilidade ambiental em vez do crescimento econômico. As populações estabilizam ou diminuem, e a ênfase está na

equidade, qualidade de vida e segurança alimentar. As emissões de GEE diminuem, mas as mudanças climáticas continuam a ter impacto.

- **SSP5-8.5 - Caminho do Crescimento Fóssil:** Nesse cenário, as políticas são orientadas pelo crescimento econômico contínuo e pela competição global. As tecnologias limpas têm adoção limitada, resultando em altas emissões de GEE. As mudanças climáticas têm impactos significativos, com esforços de mitigação sendo insuficientes.

TABELA 2 - DESCRIÇÃO E RELAÇÃO DE CENÁRIOS E CAMINHOS MODELADOS CONSIDERADOS NO AR6

CATEGORIA	DESCRIÇÃO DA CATEGORIA	CENÁRIOS DE EMISSÕES DE GEE (SSPx-y*)	RCPy**
C1	limitar o aquecimento a 1,5°C (>50%) sem exceder ou com excesso limitado***	Muito baixo (SSP1-1.9)	
C2	retornar o aquecimento a 1,5°C (>50%) depois de um alto excesso***		
C3	limitar o aquecimento a 2°C (>67%)	Baixo (SSP1-2.6)	RCP2.6
C4	limitar o aquecimento a 2°C (>50%)		
C5	limitar o aquecimento a 2,5°C (>50%)		
C6	limitar o aquecimento a 3°C (>50%)	Intermediário (SSP2-4.5)	RCP 4.5
C7	limitar o aquecimento a 4°C (>50%)	Alto (SSP3-7.0)	
C8	exceder o aquecimento de 4°C (>50%)	Muito alto (SSP5-8.5)	RCP 8.5

\* Os cenários baseados em SSP são referidos como SSPx-y, onde 'SSPx' refere-se ao Caminho Socioeconômico Compartilhado descrevendo as tendências socioeconômicas subjacentes aos cenários, e 'y' refere-se ao nível de forçamento radiativo (em watts por metro quadrado, ou Wm<sup>-2</sup>) resultante do cenário no ano de 2100.

\*\* Os cenários baseados em RCP são referidos como RCPy, onde 'y' se refere ao nível de forçamento radiativo (em watts por metro quadrado, ou Wm<sup>-2</sup>) resultante do cenário no ano de 2100. Os cenários SSP cobrem uma área mais ampla gama de futuros de GEE e poluentes atmosféricos do que os RCPs. Eles são semelhantes, mas não idênticos, com diferenças nas trajetórias de concentração. O forçamento radiativo efetivo geral tende a ser maior para os SSPs em comparação com os RCPs com o mesmo rótulo (confiança média).

\*\*\* Excesso limitado refere-se a exceder o aquecimento global de 1,5°C em até cerca de 0,1°C, superação alta em 0,1°C-0,3°C, em ambos os casos por até várias décadas.

Fonte: Adaptado de Hoesung, L. *et. al.* (2023).

O relatório produzido pelo Grupo de Trabalho I (grupo responsável por avaliar os aspectos científicos do sistema climático e de mudança do clima), traz uma tabela (TABELA 3) com as mudanças na temperatura da superfície global, que são avaliadas com base em várias linhas de evidência, para períodos selecionados de 20 anos e os cinco cenários ilustrativos de emissões considerados.

TABELA 3 - PROJEÇÃO DE MUDANÇAS NA TEMPERATURA MÉDIA DA SUPERFÍCIE GLOBAL

CENÁRIO	CURTO PRAZO, 2021–2040		MEIO PERÍODO, 2041–2060		LONGO PRAZO, 2081–2100	
	Melhor Estimativa (°C)	Faixa Muito Provável (°C)	Melhor Estimativa (°C)	Faixa Muito Provável (°C)	Melhor Estimativa (°C)	Faixa Muito Provável (°C)
SSP1-1.9	1,5	1,2 a 1,7	1,6	1,2 a 2,0	1,4	1,0 a 1,8
SSP1-2.6	1,5	1,2 a 1,8	1,7	1,3 a 2,2	1,8	1,3 a 2,4
SSP2-4.5	1,5	1,2 a 1,8	2,0	1,6 a 2,5	2,7	2,1 a 3,5
SSP3-7.0	1,5	1,2 a 1,8	2,1	1,7 a 2,6	3,6	2,8 a 4,6
SSP5-8.5	1,6	1,2 a 1,9	2,4	1,9 a 3,0	4,4	3,3 a 5,7

Fonte: Adaptado de Masson-Delmotte, V. et al. (2021).

O Quinto Relatório de Avaliação (AR5), inicialmente, define as projeções de emissão de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e, a partir disso, são simulados os efeitos nas mudanças climáticas. O AR5 define cenários de concentração denominados cenários RCP (sigla em inglês para *Representative Concentration Pathways*), e estão ligados à evolução temporal das forçantes radiativas que geram concentrações médias de GEE na atmosfera (BERNSTEIN et al., 2008; PACHAURI et al., 2014).

Os RCPs foram definidos com base na forçante radiativa total, que exprime uma medida de emissões de GEE em W/m<sup>2</sup>.

Foram determinados quatro cenários de análise e, segundo Toledo (2013), as concentrações de CO<sub>2</sub> serão maiores em 2100 em comparação aos níveis atuais, como resultado do aumento cumulativo das emissões ocorrido durante os séculos XX e XXI. Parte do CO<sub>2</sub> emitido pela atividade humana continuará a ser absorvida pelos oceanos e, portanto, é “virtualmente certo” (99% de probabilidade) que a acidificação dos mares vai aumentar, assim como já está aumentando. No melhor dos cenários – o RCP 2.6 –, a queda no pH será entre 0,06 e 0,07. Na pior das hipóteses – o RCP 8.5 –, entre 0,30 e 0,32.

A seguir são detalhados todos os cenários analisados:

- RCP 2.6 - É um cenário desenvolvido pela equipe de modelagem IMAGE da PBL (*Netherlands Environmental Assessment Agency*). Este caminho de emissão é representativo de cenários da literatura que levam a níveis de concentração de gases estufa muito baixos. Este é um cenário mais otimista de “pico-declínio”. Seu nível de forçamento radiativo primeiro atinge um valor de cerca de 3,1 W/m<sup>2</sup> até meados do século, e retorna para 2,6 W/m<sup>2</sup> até 2100. Para alcançar tais níveis de forçamento radiativo, as emissões de gases de estufa (e indiretamente emissões de poluentes atmosféricos) são substancialmente reduzidas ao longo do tempo.
- RCP 4.5 - É um cenário de estabilização, em que a forçante radiativa total é estabilizada pouco depois de 2100, sem ultrapassar o nível alto do longo termo do forçamento radiativo (CLARKE *et al.* 2007; SMITH e WIGLEY 2006; WISE *et al.* 2009). Foi desenvolvido pela equipe de modelagem do JGCRI (*Pacific Northwest National Laboratory's Joint Global Change Research Institute*) dos EUA. A estabilização radiativa ocorre em 4,5 W/m<sup>2</sup> aproximadamente após 2100, assumindo emissões de CO<sub>2</sub> constantes após 2150.
- RCP 6.0 - É um cenário desenvolvido pelo time de modelagem AIM do NIES (*National Institute for Environmental Studies*) do Japão. É um cenário de estabilização em que a forçante radiativa total é estabilizada pouco depois de 2100, através da aplicação de uma série de tecnologias e estratégias para reduzir as emissões de GEE. A estabilização radiativa ocorre em 6,0 W/m<sup>2</sup> aproximadamente após 2100, assumindo emissões de CO<sub>2</sub> constantes após 2150.
- RCP 8.5 - Este RCP é um cenário pessimista e é caracterizado pelo aumento das emissões de GEE ao longo do tempo, representando cenários da literatura que levam a altos níveis de concentrações destes gases. E foi desenvolvido usando o modelo MESSAGE e pelo quadro de avaliação integrada do IIASA (*International Institute for Applied Systems Analysis*) da Áustria. É o cenário com a maior forçante radiativa, que atinge mais de 8,5 W/m<sup>2</sup> até 2100 e continua a aumentar por um tempo. As emissões de CO<sub>2</sub> são constantes após 2250.



## 2.5 MODELOS CLIMÁTICOS GLOBAIS (MCGs)

Com o intuito de avaliar as consequências do aquecimento global, e de como diferentes cenários futuros de emissão de GEE podem influenciar nesse processo, modelos matemáticos, que buscam a representação do sistema climático global têm sido desenvolvidos, os quais são os denominados Modelos Climáticos Globais (MCGs) (WILBY, 2010).

Visando coordenar a concepção e distribuição de simulações dos MCGs do passado presente e futuro, o Programa Mundial de Pesquisa Climática (WCRP – *World Climate Research Program*) criou o *Coupled Model Intercomparison Project* (CMIP), o CMIP está em sua sexta fase - CMIP6 (EYRING et al., 2016; CARLSON e outros, 2017).

Alguns atributos globais foram definidos para que cada modelo no CMIP6 se diferencie de acordo com as condições utilizadas em sua execução e também facilitar a representação de grupos de modelos intimamente relacionados. Os atributos globais definidos foram: *experiment\_id*, que identifica o experimento raiz (família de simulações relacionadas), *sub\_experiment\_id*, que identifica um subexperimento de um conjunto definido, e *variant\_label*, que é construído a partir de 4 índices armazenados como atributos globais (*variant\_label* = r<k>i<l>p<m>f<n>, onde r = índice\_realização – número de realizações, i = índice\_de\_inicialização – índice para a variante do método de inicialização, p = índice\_físico – índice para a variante física do modelo, f = índice\_forçante – índice para a variante de forçamento), onde o padrão para este atributo é “r1i1p1f1” (TAYLOR et al., 2018).

Dias e Reboita (2021) avaliaram o desempenho de 46 MCGs do CMIP6 para selecionar os que melhor simulam a climatologia da precipitação e temperatura do ar sobre a América do Sul tropical no período de 1996-2014. Dentre os 46 modelos, as autoras concluíram que 7 deles são suficientes para aplicação em outros estudos, pois apresentaram resultados suficientes, ou seja, menor viés e maior habilidade em reproduzir o clima da América do Sul, sendo eles: E3SM-1-0, EC-Earth3, EC-Earth3-AerChem, EC-Earth3-Veg, IPSL-CM6A-LR, MPI-ESM1-2-LR e TaiESM1.

## 2.6 DISPONIBILIDADE HÍDRICA

Uma bacia hidrográfica responde à precipitação que incide sobre ela através da vazão no tempo, que resulta da interação de vários fatores, incluindo precipitação, tipo e uso do solo, geologia e morfologia da bacia. A disponibilidade hídrica é definida como a porção da vazão que pode ser utilizada pela sociedade para o seu desenvolvimento, desde que não prejudique o ambiente aquático. Por outro lado, a vazão remanescente, é aquela destinada a manter a integridade do sistema fluvial e a conservação do ambiente aquático após o uso da água (CRUZ e TUCCI, 2007).

A determinação das vazões mínimas de referência desempenha um papel crucial na quantidade de água concedida ao usuário, ou seja, disponível para outorga. É importante destacar que apenas uma porção das vazões mínimas de referência está sujeita à outorga, o que resulta em restrições significativas no uso da água, especialmente durante os períodos de maior abundância hídrica (SILVA, SILVA e MOREIRA, 2015).

No Paraná, o órgão responsável pela emissão outorga de direito de uso, bem como demais questões relacionadas aos recursos hídricos, é o Instituto Água e Terra (IAT), que segue o Manual de Outorgas do Estado Paraná<sup>1</sup>, elaborado em 2006, para estabelecer a vazão máxima outorgável, sendo ela 50% da vazão de referência, a  $Q_{95\%}$ .

Uma ferramenta utilizada para determinar a  $Q_{95\%}$  é a curva de permanência. A análise da curva de permanência de vazões, também conhecida como curva de duração (FDC – *flow duration curve*), permite a avaliação da frequência com que a vazão em um determinado trecho de um corpo d'água é igualada ou superada durante um período histórico específico. Essa representação é uma função cumulativa de probabilidade das vazões ou da probabilidade de excedência das vazões (SILVA, 2022).

---

<sup>1</sup> Disponível em: [https://www.iat.pr.gov.br/sites/agua-terra/arquivos\\_restritos/files/documento/2020-10/manual\\_outorgas\\_suderhsa\\_2006.pdf](https://www.iat.pr.gov.br/sites/agua-terra/arquivos_restritos/files/documento/2020-10/manual_outorgas_suderhsa_2006.pdf)

## 2.7 ESTUDOS SIMILARES

O uso do modelo GR2M para simulação de vazão em cenários de mudanças climáticas já foi empregado em diversos estudos em diferentes regiões do mundo, a seguir são apresentados alguns deles.

Mendez *et al.* (2022) aplicou o modelo GR2M em cinco bacias hidrográficas tropicais localizadas na Costa Rica, com o objetivo de avaliar os impactos das mudanças climáticas nas características dos fluxos das bacias. Foram selecionados cinco MCGs, o HadGEM2-ES, CanESM2, EC-EARTH, MIROC5 e MPI-ESM-LR, reduzidos por dois Modelos Climáticos Regionais (MCRs), o HadRM3P e RCA4. As RCPs trabalhadas foram a 2.6, 4.5 e 8.5 usando o período de referência de 1961-1990. O GR2M foi utilizado para reproduzir os padrões históricos mensais de escoamento das bacias, sendo após calibração e validação do modelo, realizada a simulação da projeção para um futuro próximo (2011–2040), futuro médio (2041–2070) e futuro distante (2071–2100) e aplicada a correção por viés (bias). As métricas estatísticas utilizadas para verificar a eficiência do modelo foram o NSE e PBIAS, com resultados ficando na classificação de muito bom a bom para todas as bacias.

Hadour, Mahé e Meddi (2020) também realizaram estudos com o GR2M na região do noroeste da Argélia, para as suas três principais bacias hidrográficas. O objetivo do trabalho foi estudar a sensibilidade dos parâmetros hidrológicos para futuras mudanças climáticas. Isso foi alcançado usando o modelo hidrológico GR2M e os dados do cenário climático do modelo CNRM-CM5. O período histórico de dados considerado foi de 1953 a 2010 e a projeção futura foi até o ano de 2100. Os cenários analisados foram os RCPs 4.5 e 8.5. Aplicando o NSE foi obtido o valor de 0,60, considerado segundo a classificação de NSE como satisfatório.

Sadio *et al.* (2023), avaliaram efeitos das alterações climáticas nas características do escoamento superficial de duas bacias hidrográficas localizadas no Senegal e Guiné-Bissau, Casamance e Kayanga-Géva, respectivamente. Foram utilizados dezoito MCGs dentro do SSP1-2.6 e SSP5-8.5, com o período de referência de 1985-2014. Para calibração e validação do modelo GR2M foram considerados os períodos de 1981–1986 (calibração) e 1987–1992 (validação) para a bacia Casamance, e 1985–1988 (calibração) e 1999–2002 (validação) para a bacia Kayanga-Géva. A projeção de escoamento com o modelo hidrológico foi realizada para um futuro próximo (2011–2040), futuro médio (2041–2070) e futuro distante

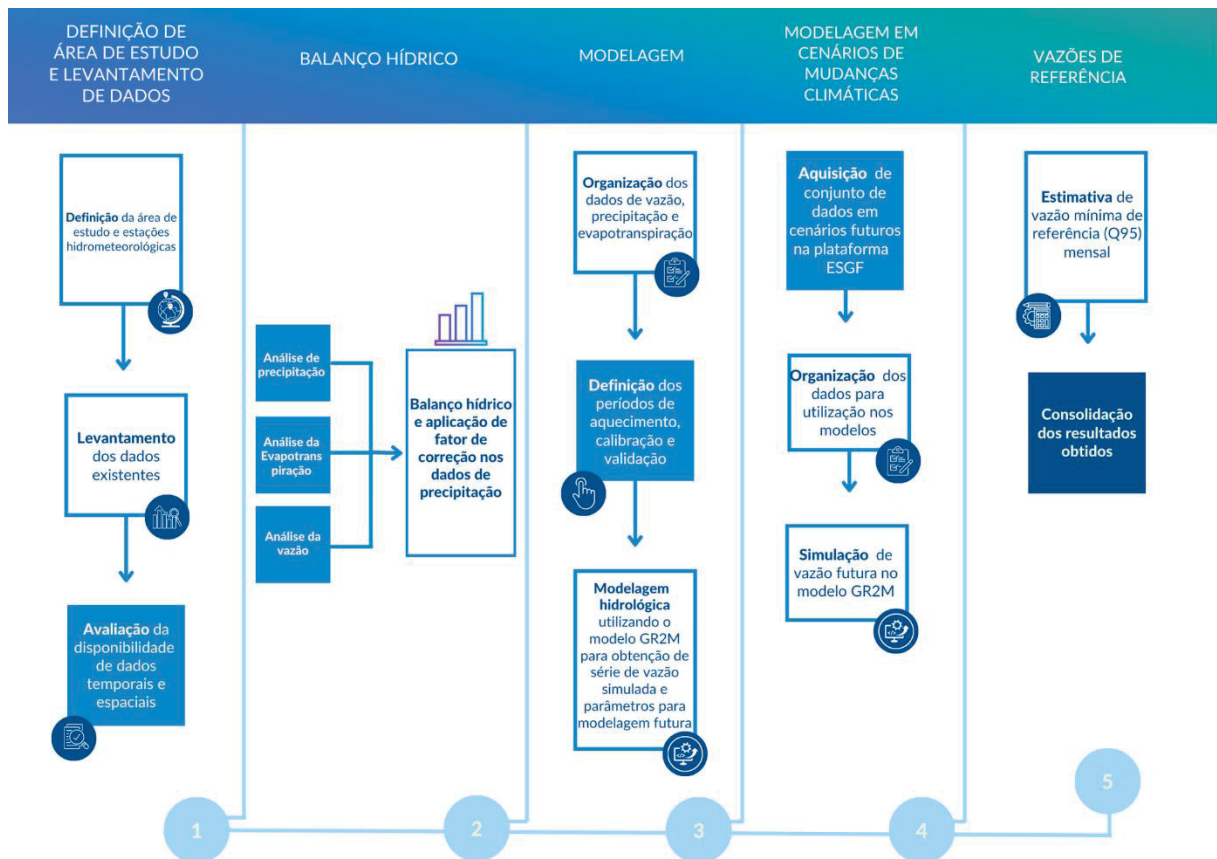
(2071–2100), utilizando a média do conjunto de MCGs e aplicada a correção por viés (bias). A métrica de avaliação de desempenho do modelo foi o NSE onde se obteve a classificação de bom para as bacias.

Sifuentes et al. (2023), utilizaram o modelo GR2M com dados do MCG CNRM-CM6-1 de quatro SSPs (126, 245, 370 e 585) para avaliar mudanças futuras na evapotranspiração e na vazão da bacia do rio Sardinias, no norte de Durango, México. Os períodos de calibração e validação foram respectivamente, 1970-1988 e 1989-2006. Os valores obtidos para o NSE na calibração e validação foram de 0,78 e 0,75, sendo classificados como muito bom. As projeções foram realizadas para um período até o ano de 2100.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentadas descrições da área de estudo, obtenção e tratamento do conjunto de dados utilizado e uso dos modelos climáticos e hidrológico. A FIGURA 2 estabelece a ordem da metodologia realizada.

FIGURA 2 - RESUMO DA METODOLOGIA APLICADA



Fonte: A autora (2023)

A primeira etapa consiste na definição da área de estudo e estações hidrometeorológicas. Com este passo cumprido é realizado o levantamento de dados de plataformas provenientes de diferentes instituições e órgãos. Estes dados passam por uma avaliação de disponibilidade temporal e espacial, para então se iniciar a segunda etapa.

A segunda etapa se concentra na análise dos dados de precipitação, realizando preenchimento de falhas, exclusão de dados espúrios e média de Thiessen, e dos dados de evapotranspiração e vazão através do balanço hídrico, onde é aplicado um fator de correção ao dado de precipitação para que se obtenha o

fechamento do balanço hídrico e garantindo um melhor desempenho do modelo hidrológico.

Na terceira etapa os dados hidrometeorológicos históricos já tratados são organizados no padrão de entrada do modelo GR2M, o período de aquecimento e calibração do modelo é definido e a simulação da vazão é executada. Com os parâmetros calibrados do modelo a quarta etapa pode ser iniciada. Para isso o conjunto de dados de cenários futuros dos MCGs é adquirido da plataforma ESGF (*Earth System Grid Federation*). Os dados são analisados e organizados no padrão de entrada do modelo hidrológico e a simulação da vazão em cenários futuros é executada.

A etapa cinco conclui o estudo com a consolidação dos resultados obtidos e avaliação da disponibilidade hídrica tendo como suporte a estimativa de vazão de referência  $Q_{95}$ .

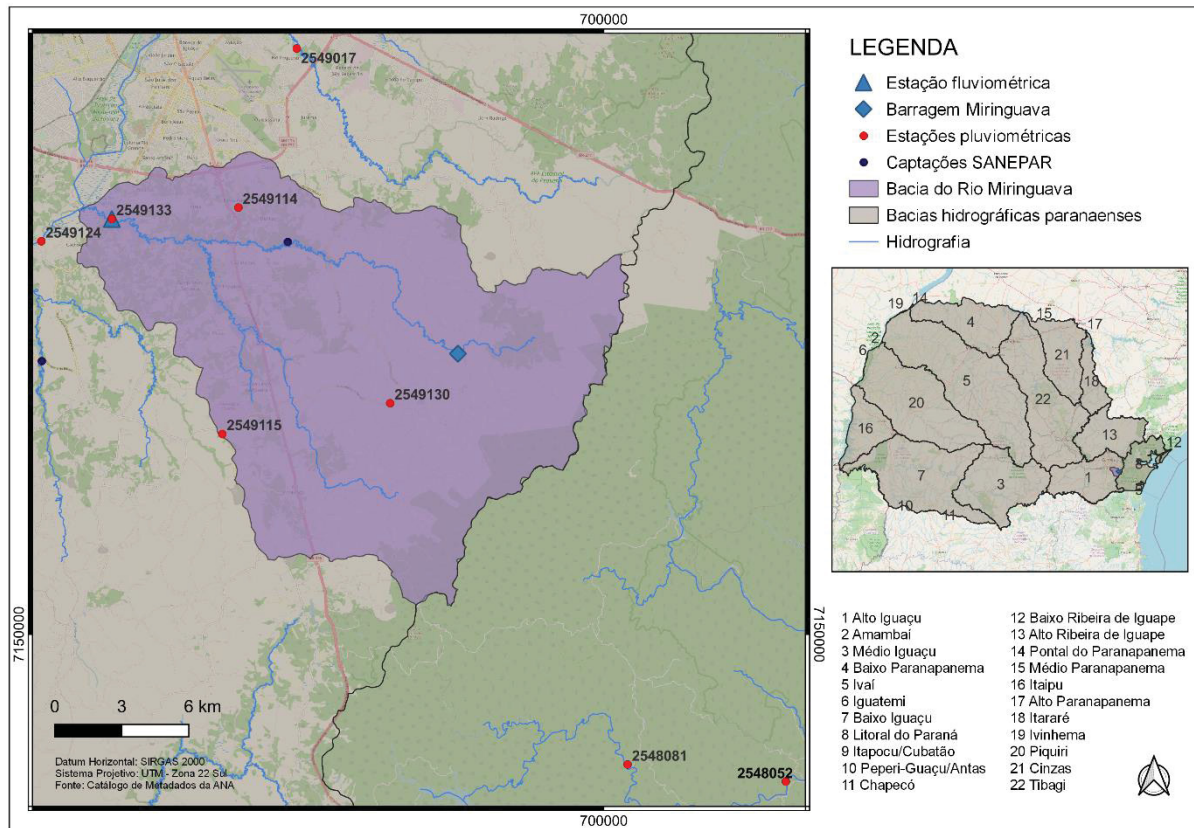
### 3.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo, FIGURA 3, está localizada na bacia do Alto Iguaçu, no Estado do Paraná. De acordo com a classificação de Köppen, a região é influenciada por dois tipos climáticos Cfa e Cfb, clima subtropical e temperado respectivamente, com tendência de concentração de chuvas no verão, sem estação seca definida, sendo a média do trimestre mais seco os meses de junho, julho e agosto e média do trimestre mais chuvoso os meses de dezembro, janeiro e fevereiro (CAVIGLIONE *et al.*, 2000).

De acordo com a Coordenação da Região Metropolitana de Curitiba (COMEC) a Região Metropolitana de Curitiba (RMC) é composta por 29 municípios, sendo divididos em dois grandes grupos, Núcleo Urbano Central (NUC) com os municípios de Almirante Tamandaré, Araucária, Campina Grande do Sul, Campo Largo, Campo Magro, Colombo, Curitiba, Fazenda Rio Grande, Itaperuçu, Pinhais, Piraquara, Quatro Barras, Rio Branco do Sul e São José dos Pinhais e os municípios que compõem o Vale da Ribeira: Adrianópolis, Bocaiúva do Sul, Cerro Azul, Doutor Ulysses, Itaperuçu, Rio Branco do Sul e Tunas do Paraná (COMEC, 2012), totalizando uma área de 16.580,55 km<sup>2</sup> (IBGE, 2010). A área de estudo está localizada no município de São José dos Pinhais, inserido no bioma de Mata Atlântica. O município possui uma população de 329.222, de acordo com dados do censo de 2022, e área territorial de

946.435 km<sup>2</sup>, sendo que a bacia delimitada para o estudo, do Miringuava, abrange uma área de 272,45 km<sup>2</sup>.

FIGURA 3 - ÁREA DE ESTUDO



Fonte: A autora (2023).

## 3.2 CONJUNTO DE DADOS HISTÓRICOS

A seguir é apresentado o inventário de dados hidrometeorológicos históricos utilizados neste estudo. Os dados estão organizados nas seções de i) precipitação, ii) evapotranspiração e iii) vazão. Esses dados foram selecionados para análise de acordo com a disponibilidade e qualidade dos mesmos.

### 3.2.1 Precipitação

Os dados de precipitação foram obtidos do Portal HidroWeb, uma ferramenta integrante do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), da Agência Nacional de Águas e Saneamento (ANA). Foram selecionadas oito estações

pluviométricas, levando em consideração localização e disponibilidade de dados. A TABELA 4 apresenta as estações pluviométricas que foram utilizadas considerando a área delimitada para estudo, a operadora, o código, a localização e o período dos dados.

TABELA 4 - ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS UTILIZADAS NO ESTUDO

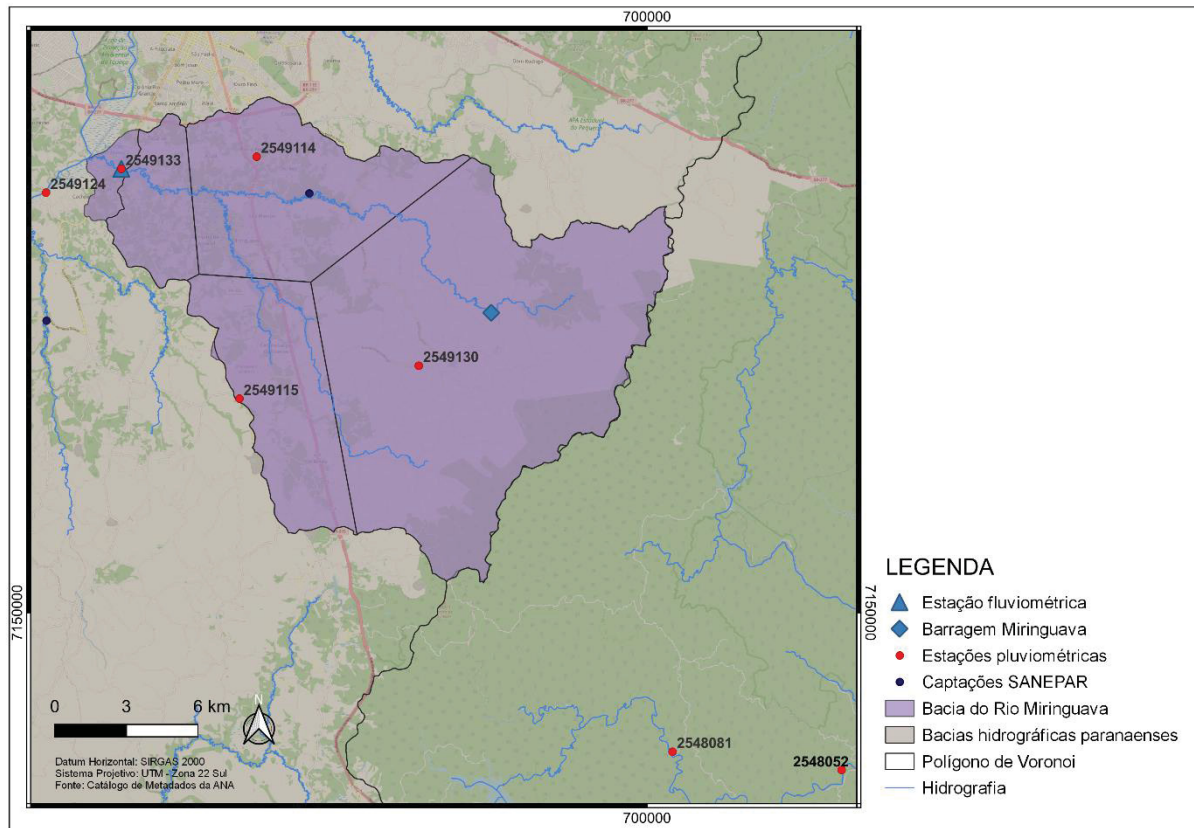
MUNICÍPIO	OPERADORA	CÓDIGO	NOME	LAT	LON	PERÍODO
São José dos Pinhais	AGUASPARANÁ	2549017	Fazendinha	-25,51	-49,14	01/06/1964 - 31/12/2019
São José dos Pinhais	AGUASPARANÁ	2548052	Ilha do Rio Claro	-25,81	-48,92	01/06/1974 - 31/12/2019
São José dos Pinhais	COPEL	2548081	UHE Chaminé Barramento Res. Salto do Meio	-25,80	-48,99	01/01/1999 - 31/12/2018
São José dos Pinhais	AGUASPARANÁ	2549114	Grammer	-25,58	-49,17	01/01/2002 - 31/07/2007
São José dos Pinhais	AGUASPARANÁ	2549115	Campo Largo da Roseira	-25,67	-49,17	01/01/2002 - 31/07/2007
São José dos Pinhais	AGUASPARANÁ	2549124	Ponte do Umbarazinho	-25,59	-49,25	01/01/2002 - 01/12/2011
São José dos Pinhais	AGUASPARANÁ	2549130	Malhada	-25,66	-49,10	01/04/2007 - 31/05/2007
São José dos Pinhais	AGUASPARANÁ	2549133	Cachoeira	-25,58	-49,22	01/02/2019 - 03/03/2019

Como pré-tratamento dos dados de precipitação em todas as estações valores negativos ou maiores diários que 200 mm foram substituídos por *Not a Number* (NaN). A escolha do valor máximo foi devido a análise de valores máximos das séries de dados, excluindo assim inconsistências. Em seguida as falhas foram completadas com dados de estações próximas, considerando um período de dados de 01-01-2000 a 31-12-2019. As estações 2549114, 2549115, 2549130 e 2549133 estão localizadas na bacia do Miringuava, portanto foram selecionadas para serem preenchidas por estações fora da área da bacia que possuísem dados e que estivessem o mais próximo possível de uma estação da área delimitada, são elas: 2549017, 2548052, 2548081 e 2549124. A estação 2549133 (Cachoeira) está



localizada na exutória da bacia de estudo, a FIGURA 4 possibilita a visualização da localização e proximidade das estações mencionadas.

FIGURA 4 - LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS E POLÍGONOS DE VORONOI



Fonte: A autora (2023).

O preenchimento de dados das estações foi realizado na ordem apresentada na TABELA 5 de forma que se obtivesse o maior preenchimento possível de dados, considerando os dados das estações de apoio.

TABELA 5 - ORDEM DE PREENCHIMENTO DE DADOS PLUVIOMÉTRICOS

ESTAÇÃO	1º	2º	3º	4º
<b>2549114</b>	2549017	2549124	2549115	2548052
<b>2549115</b>	2549017	2548081	-	2548052
<b>2549130</b>	2549017	2548081	-	2548052
<b>2549133</b>	2549124	2549017	2549115	2548052

Para controle do número de falhas nas séries foi realizada a soma de NaN inicialmente e após os preenchimentos, considerando o período de 01-01-2000 a 31-12-2019, os valores são apresentados na TABELA 6.

TABELA 6 - CONTABILIZAÇÃO DO NÚMERO DE FALHAS NAS SÉRIES DE DADOS DE PRECIPITAÇÃO ANTES E APÓS PREENCHIMENTO

<b>ESTAÇÃO</b>	<b>SOMATÓRIO DE NAN SEM PREENCHIMENTO</b>	<b>SOMATÓRIO DE NAN COM PREENCHIMENTO</b>
<b>2549114</b>	6881	0
<b>2549115</b>	6238	0
<b>2549130</b>	7275	0
<b>2549133</b>	7277	0

Finalizando a etapa foi ainda realizada a média dos dados de precipitação das quatro estações mencionadas, utilizando o método da média aritmética e método de Thiessen.

Para o método de Thiessen se fez uso do complemento disponível no software livre QGIS (versão 3.22) de Polígonos de Voronoi, onde se determina pontos de delimitação da área alvo, aqui sendo utilizados os pontos de localização das estações nas extremidades da bacia e aplicando um buffer de modo que se conseguisse abranger toda a área desejada, obtendo assim polígonos sobre a área da bacia e suas respectivas áreas. A TABELA 7 apresenta as áreas adquiridas e utilizadas no método para cada estação.

TABELA 7 - ÁREA DOS POLÍGONOS DO MÉTODO DE THIESSEN PARA CADA ESTAÇÃO

<b>ESTAÇÃO</b>	<b>ÁREA DO POLÍGONO (KM<sup>2</sup>)</b>
<b>2549114</b>	54,03
<b>2549115</b>	42,34
<b>2549130</b>	157,02
<b>2549133</b>	18,28

### 3.2.2 Evapotranspiração

Para este estudo foram utilizados os dados de evapotranspiração obtidos pela plataforma *Application for Extracting and Exploring Analysis Ready Samples*

(AppEEARS), o produto MOD16A2GF versão 6 do sensor “NASA’s Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer” (MODIS), que segue a equação de *Penman-Monteith* para obter uma série temporal. Não foi necessário realizar nenhuma ação de preenchimento nos dados.

O produto MOD16A2GF utilizado foi recortado espacialmente a partir do *shapefile* das subbacias de estudo, possui extensão temporal de 2000 a 2019 e resolução de 500 m. O MODIS utiliza o índice de área foliar, fração da radiação fotossinteticamente ativa e albedo para calcular a evapotranspiração (RUNNING *et al.* 2019).

### 3.2.3 Vazão

Os dados de vazão foram obtidos do Hidroweb da estação localizada na exutória da bacia. A TABELA 8 apresenta informações sobre esta estação.

TABELA 8 - DADOS DA ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA

MUNICÍPIO	OPERADORA	CÓDIGO	NOME	LAT	LON	PERÍODO
São José dos Pinhais	AGUASPARANÁ	65015400	Cachoeira	-25,58	-49,22	01/04/1976 - 02/03/2020

Não foi realizada nenhuma operação sobre este dado no sentido de preenchimento, apenas uma conversão de unidade de  $m^3/s$  para  $mm/dia$  e o acumulado mensal desses dados, tendo em vista o dado de entrada do modelo.

### 3.3 CORREÇÕES COM BASE NO BALANÇO HÍDRICO

O balanço hídrico foi utilizado para análise dos dados em conjunto e aplicação de fator de correção nos dados de precipitação a fim de se minimizar possíveis inconsistências.

Diversos estudos apontam que o uso de pluviômetros pode gerar erros na submensuração da precipitação, tanto para neve (precipitação nival) quanto para chuva (precipitação líquida), principalmente devido ao efeito do vento (LARSON e PECK, 1974; LEGATES e DELIBERTY, 1993; GROISMAN e LEGATES, 1994; DUCHON e ESSENBERG, 2001; HOELTGEBAUM, 2021). As curvas de dupla massa

podem ser usadas para corrigir os dados de precipitação (SEARCY e HARDISON, 1960).

A análise foi realizada plotando o gráfico dos dados de precipitação média, do método de Thiessen, pela soma dos dados de evapotranspiração e vazão. O fator de correção foi definido de maneira arbitrária, visualizando a aderência dos dados à uma reta auxiliar 1:1.

Com os dados corrigidos foi então criada a planilha de dados no formato de entrada do modelo GR2M, com os dados de evapotranspiração do MODIS, os dados de vazão do Hidroweb e os dados de precipitação com o fator de correção aplicado.

### 3.4 CONJUNTO DE DADOS FUTUROS

Os dados hidrometeorológicos futuros de precipitação e evapotranspiração foram obtidos da base de dados do CMIP6<sup>2</sup>, disponibilizados na plataforma da ESGF.

Primeiramente se aplicou critérios de corte para se obter quais os modelos poderiam atendê-los de acordo com a TABELA 9.

TABELA 9 - CRITÉRIOS APLICADOS NA BASE DE DADOS CMIP6

ITEM	VARIÁVEL
Table ID	Amon
Variable	pr, evspsbl
Experiment ID	ssp126, ssp245, ssp370, ssp585
Variant Label	r1i1p1f1

Sendo Table ID a frequência do dado, se será diário, mensal ou anual, aqui inserimos a frequência mensal (Amon), Variable a variável de interesse, onde pr = precipitação e evspsbl = evapotranspiração, Experiment ID os cenários de mudanças climáticas e Variant Label, um código referente a um conjunto de dados com mesmas condições de simulação.

A aplicação desses critérios possibilita um corte nos modelos climáticos globais, permitindo a escolha de dados dos modelos que os atendem, estabelecidos inicialmente. De uma lista de 56 modelos, resultantes do corte através dos critérios,

<sup>2</sup> <https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6/>

somente 23 apresentaram disponibilidade de dados para todos os cenários abordados neste estudo, dentre estes foram selecionados oito modelos. A escolha dos modelos teve como pressuposto a aderência dos dados dos MCGs aos dados observados.

As séries temporais foram obtidas para o ponto de localização geográfica da estação fluviométrica da bacia do Miringuava (lat="-25,5892", lon="310,7719" - os modelos CMIP6 usam longitudes de 0°L a 360°L). O período de dados para estes modelos é de 01-2015 a 12-2100 e a unidade de medida das variáveis de precipitação e evapotranspiração é dada por  $\text{Kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ .

### 3.5 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO

A escolha das constantes do modelo GR2M foi realizada por meio da calibração, onde elas são otimizadas com base nas séries de precipitação, evapotranspiração e vazão observadas. O critério de Nash-Sutcliffe (NSE) foi usado para escolha das constantes. Os intervalos mínimo e máximo para busca das constantes que maximizam o NSE pelo método de calibração são apresentados na TABELA 10.

TABELA 10 – INTERVALOS DE CONSTANTES UTILIZADOS NO MODELO GR2M

CONSTANTES	DESCRIÇÃO	INTERVALO
<b>X1</b>	Capacidade do reservatório de produção (mm)	0 a 6000
<b>X2</b>	Coefficiente de trocas subterrâneas (mm/dia)	-20 a 10

A calibração do modelo utiliza o método de otimização DE. Deve-se definir um período de anos para a aquecimento do modelo. Neste estudo é considerado um período de 10 anos. Para a calibração, foram utilizados 9 anos de dados e para validação 4 anos. Os períodos considerados são apresentados na TABELA 11.

TABELA 11 - PERÍODO DE AQUECIMENTO, CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO

DESCRIÇÃO	INÍCIO	FIM
<b>Período de aquecimento</b>	2000-01-31	2010-01-31
<b>Período de calibração</b>	2010-02-28	2019-12-31
<b>Período de validação</b>	2010-01-31	2014-12-31

De acordo com Krause *et al.* (2005), as diferenças entre os valores observados e previstos em um modelo hidrológico são calculadas como valores quadrados, desta forma maiores valores são superestimados enquanto que os menores são negligenciados. Em previsões de escoamento os picos de vazões tendem a ser superestimados no desempenho do modelo. O coeficiente de classificação de desempenho do modelo NSE pode variar de 1,0, ajuste perfeito, a  $-\infty$ , ajuste de má qualidade. Os valores de referência do coeficiente estatístico NSE são apresentados na TABELA 12.

TABELA 12 - CLASSIFICAÇÃO NSE

MUITO BOM	BOM	SATISFATÓRIO	INSATISFATÓRIO
$0,75 < NSE < 1,00$	$0,65 < NSE \leq 0,75$	$0,50 < NSE \leq 0,65$	$NSE < 0,50$

Fonte: Adaptado de MORIASI *et al.* (2007)

### 3.6 SIMULAÇÃO DAS SÉRIES FUTURAS USANDO DADOS DE MODELOS CLIMÁTICOS

Para as simulações de vazão futura por meio do modelo hidrológico GR2M foram utilizados os parâmetros calibrados pelo modelo com os dados históricos mencionados.

Os MCGs selecionados para o estudo são citados na TABELA 13, seguidos de sua referência bibliográfica, dentre os oito modelos utilizados, dois estão entre os modelos citados por Dias e Reboita (2021), devido a disponibilidade de dados tanto para os quatro cenários analisados quanto para as variáveis trabalhadas, além de observada sua aderência aos dados observados.

TABELA 13 - MODELOS CLIMÁTICOS GLOBAIS UTILIZADOS E REFERÊNCIAS

MODELO	DESCRIÇÃO	RESOLUÇÃO (LONxLAT)	REFERÊNCIA
ACCESS-CM2	<i>Australian Community Climate and Earth System Simulator coupled model</i>	192x144	Bi <i>et al.</i> (2020)
CanESM5	<i>Canadian Earth System Model version 5</i>	128x64	Swart <i>et al.</i> (2019)
EC-Earth 3	<i>European community Earth system model</i>	512x256	Döscher <i>et al.</i> (2022)

MODELO	DESCRIÇÃO	RESOLUÇÃO (LONxLAT)	REFERÊNCIA
IPSL-CM6A-LR	<i>Institut Pierre-Simon Laplace climate model low resolution</i>	144x143	Boucher <i>et al.</i> (2019)
CAS-ESM2-0	<i>Second version of the Chinese Academy of Sciences Earth System Model</i>	256x128	Zhang <i>et al.</i> (2020)
CMCC-ESM2	<i>Euro-Mediterranean Centre on Climate Change Earth System Model second generation</i>	288x192	Lovato <i>et al.</i> (2022)
KACE-1-0-G	<i>Korean Advanced Community Earth system model</i>	192x144	Byun <i>et al.</i> (2019)
MRI-ESM2-0	<i>Meteorological Research Institute Earth System Model version 2.0</i>	320x160	Yukimoto <i>et al.</i> (2019)

Como ferramenta de avaliação estatística dos dados dos MCGs, com base no índice de erro, foi utilizado o viés percentual (PBIAS), o valor ideal que indica simulação precisa do modelo é zero, valores positivos e negativos indicam viés de subestimação e superestimação do modelo (GUPTA *et al.*, 1999). O PBIAS, calculado de acordo com a equação 14, indica em porcentagem o desvio dos dados que estão sendo avaliados (MORIASI *et al.* 2007). A classificação de desempenho é indicada na TABELA 14.

$$PBIAS = \frac{\sum_{t=1}^N (q_t^{obs} - q_t^{sim})}{\sum_{t=1}^N q_t^{obs}} \times 100\% \quad [14]$$

Nesta equação  $q^{obs}$  se refere aos dados observados e  $q^{sim}$  aos dados simulados.

TABELA 14 - CLASSIFICAÇÃO PBIAS (%)

MUITO BOM	BOM	SATISFATÓRIO	INSATISFATÓRIO
$PBIAS \leq \pm 10$	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$	$PBIAS \geq \pm 25$

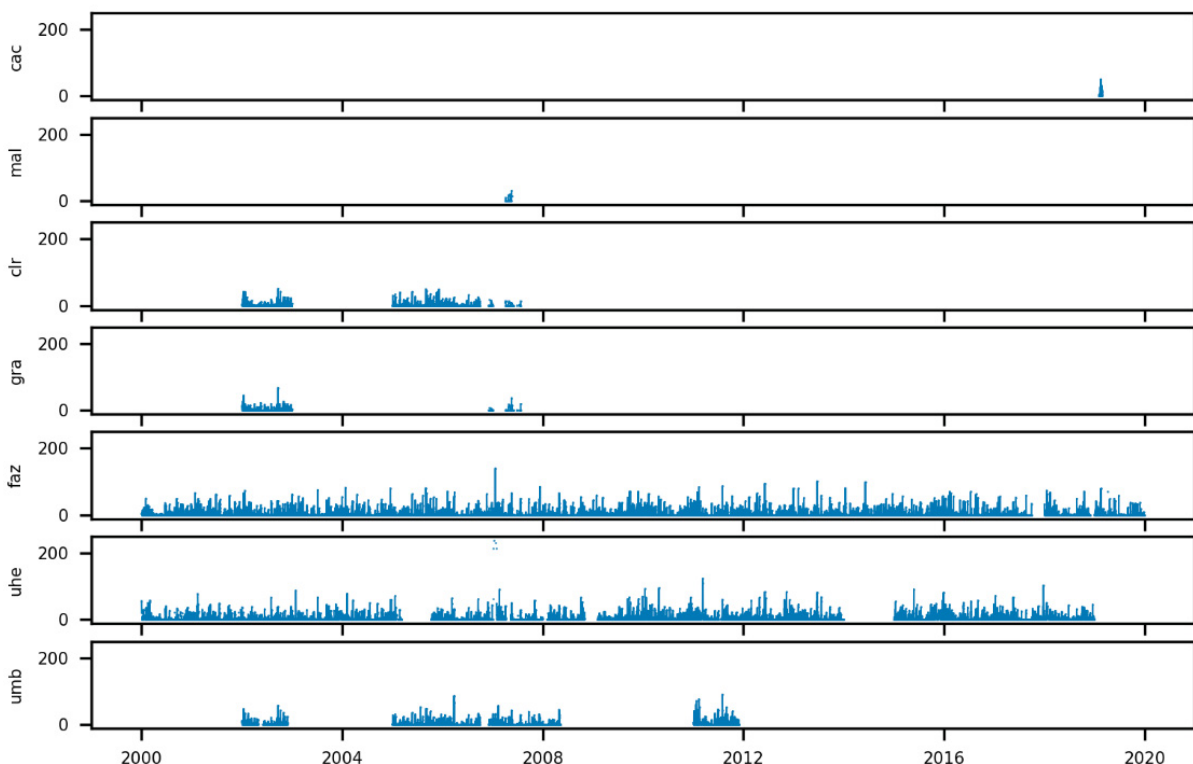
Fonte: Adaptado de MORIASI *et al.* (2007).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 DADOS DE PRECIPITAÇÃO OBSERVADOS

Os dados de precipitação das estações Cachoeira (2549133), Malhada (2549130), Campo Largo da Roseira (2549115) e Grammer (2549114), localizadas no interior da bacia de estudo, possuíam muitas falhas, algumas estações continham dados por um período de poucos meses, sem ao menos completar um ano de informação. Desta forma foi necessário expandir o raio de seleção de estações a fim de preencher as séries de dados, utilizando as estações Fazendinha (2549017), UHE Chaminé Barramento Res. Salto do Meio (2548081) e Ponte do Umbarazinho (2549124). A FIGURA 5 apresenta a série histórica disponibilizada no Hidroweb para cada estação pluviométrica utilizada.

FIGURA 5 - GRÁFICOS DE PRECIPITAÇÃO DAS ESTAÇÕES UTILIZADAS NO ESTUDO (2000 - 2020)



Legenda: cac – Cachoeira (2549133), mal – Malhada (2549130), clr – Campo Largo da Roseira (2549115), gra – Grammer (2549114), faz – Fazendinha (2549017), uhe – UHE Chaminé Barramento Res. Salto do Meio (2548081), umb – Ponte do Umbarazinho (2549124).



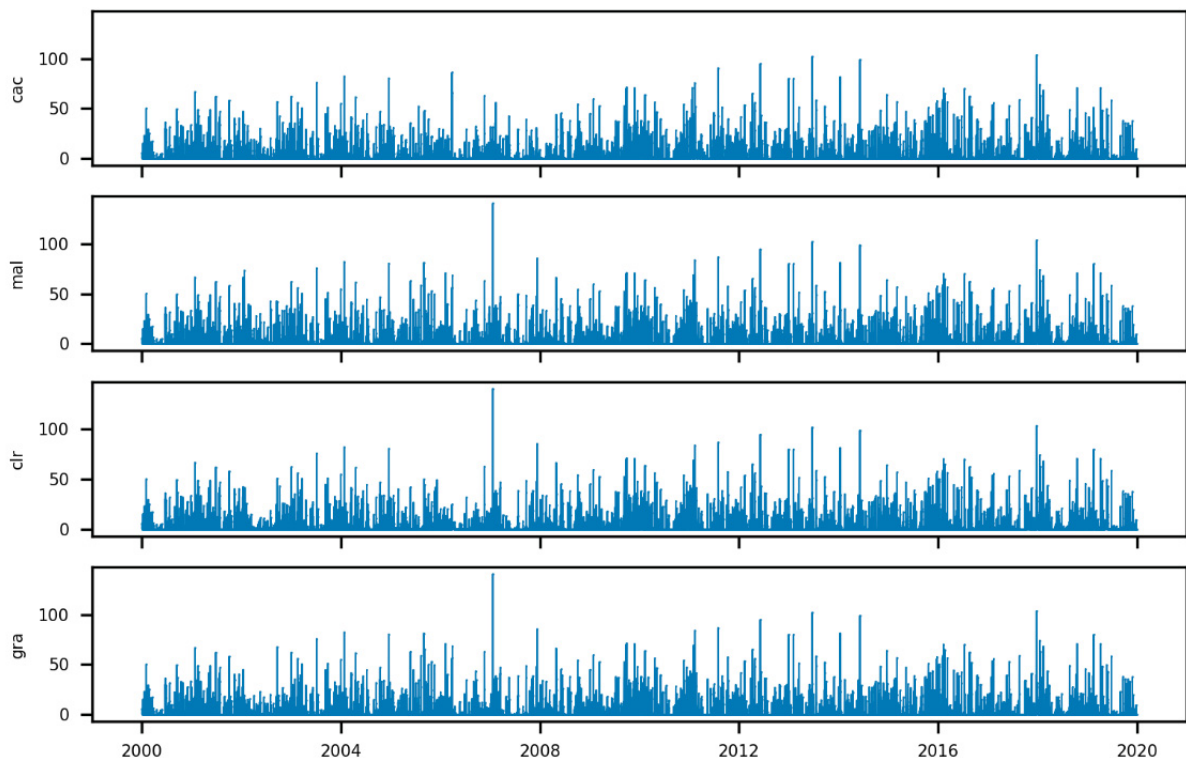
As séries foram preenchidas integralmente, FIGURA 6, o preenchimento representou entre 85% e 99% dos dados das estações da bacia do Miringuava, como detalhado na TABELA 15.

TABELA 15 - PORCENTAGEM DE PREENCHIMENTO DE DADOS DE PRECIPITAÇÃO

ESTAÇÃO	SOMATÓRIO DE VALORES NULOS	SOMATÓRIO DE VALORES NÃO NULOS	PORCENTAGEM DE PREENCHIMENTO (%)
2549114	6881	424	94,2
2549115	6238	1067	85,4
2549130	7275	30	99,6
2549133	7277	28	99,6

Com os dados preenchidos foi calculada a média de Thiessen das quatro estações pluviométricas para que se pudesse seguir com as demais etapas do estudo com um dado representativo da variável de precipitação.

FIGURA 6 - GRÁFICOS DAS SÉRIES PREENCHIDAS DE PRECIPITAÇÃO



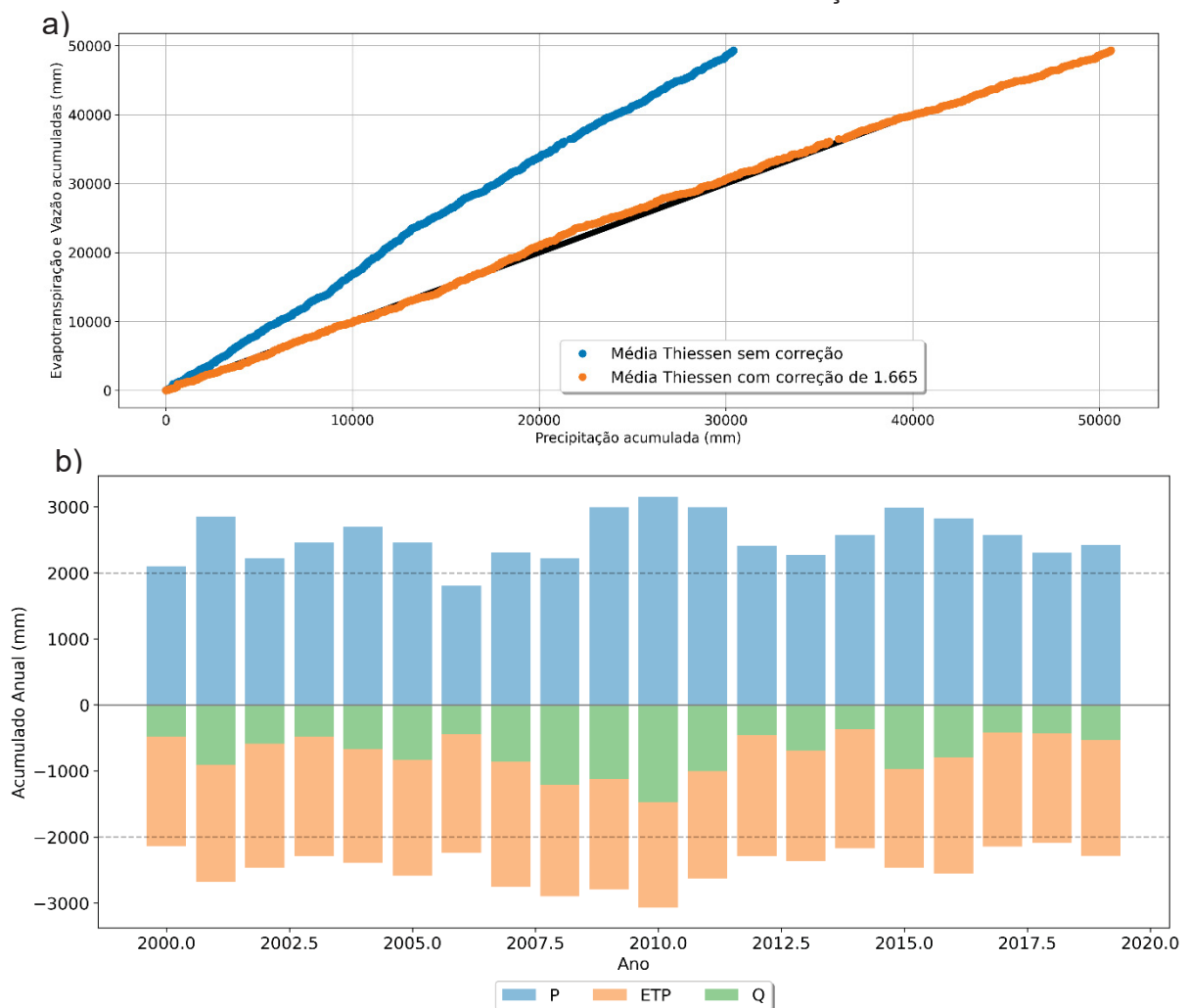
Legenda: cac – Cachoeira (2549133), mal – Malhada (2549130), clr – Campo Largo da Roseira (2549115), gra – Grammer (2549114).

## 4.2 BALANÇO HÍDRICO

Ao plotar o gráfico de dupla massa para verificar o balanço hídrico foi identificado que os dados históricos não representavam de maneira satisfatória o fechamento do balanço, tendo como base a literatura que nos chama a atenção para o fato de que dados de precipitação por vezes podem apresentar erros de submensuração devido ao uso de pluviômetros, aplicou-se um fator de correção somente aos dados de precipitação.

O fator de correção aplicado foi de 1.665, a FIGURA 7a permite a visualização do efeito da correção dos dados, e a FIGURA 7b a observação da variação temporal dos dados de cada variável.

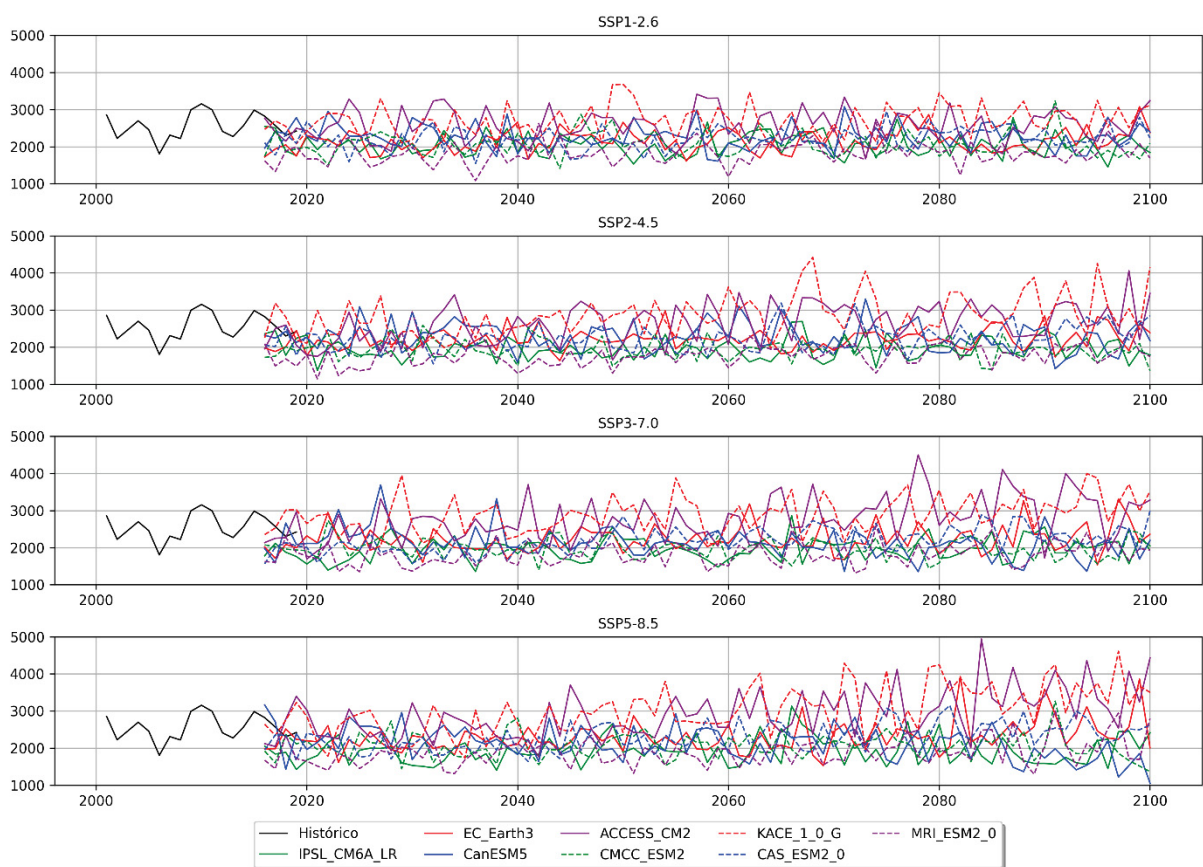
FIGURA 7 – GRÁFICOS PARA ANÁLISE DO BALANÇO HÍDRICO



### 4.3 COMPARAÇÃO DE DADOS PRETÉRITOS E PROJEÇÕES DO IPCC

Para se avaliar o desempenho dos MCGs na região de estudo, sendo o foco a avaliação da vazão simulada para a bacia, é necessário que se analise os dados de precipitação e evapotranspiração em conjunto com os resultados da vazão simulada pelo modelo hidrológico.

FIGURA 8 - PRECIPITAÇÃO ANUAL ACUMULADA NA BACIA DO MIRINGUAVA POR SSP (2000-2100)



Legenda: Representação gráfica dos dados de precipitação de cada MCG e média de Thiessen dos dados de precipitação históricos observados, para cada SSP.

A FIGURA 8 apresenta gráficos das séries de precipitação para a bacia do Miringuava, os dados de cada MCG em conjunto com a média de Thiessen do dado observado histórico, foram plotados para cada SSP. Visualmente as diferenças entre os dados de cada modelo são mais perceptíveis nos cenários mais extremos, para avaliar estatisticamente os dados utilizou-se um período histórico que possuísse

dados tanto observados como os simulados pelos MCGs, o período selecionado foi o de 2016 a 2020 e os valores obtidos para o PBIAS são apresentados na TABELA 16.

TABELA 16 – VALORES OBTIDOS DE PBIAS - DADOS DE PRECIPITAÇÃO

CENÁRIO	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5
IPSL_CM6A_LR	14,01	12,79	25,49	28,76
EC_Earth3	26,26	17,75	22,73	13,82
CanESM5	6,00	9,89	17,78	4,20
ACCESS_CM2	3,06	9,97	4,88	-2,25
CAS_ESM2_0	17,85	16,89	23,29	17,74
CMCC_ESM2	20,97	26,95	20,95	20,80
KACE_1_0_G	3,25	16,89	23,29	17,74
MRI_ESM2_0	32,52	33,14	27,01	29,03

O modelo com melhor desempenho, neste quesito, foi o ACCESS-CM2, que obteve a classificação de muito bom desempenho para a totalidade de SSPs, o modelo CanESM5 obteve satisfatório apenas para o SSP3-7.0, para os demais sua classificação ficou em muito bom, e o modelo KACE-1-0-G obteve classificação máxima somente no SSP1-2.6. O modelo EC-Earth3 obteve desempenho insatisfatório apenas para SSP1-2.6, sendo os demais entre bom e satisfatório, já o modelo IPSL-CM6A-LR apresentou desempenho insatisfatório para os dois SSPs mais extremos e bom para os demais. Os modelos CAS-ESM2-0 e CMCC-ESM2 apresentaram predominantemente classificação satisfatória. O modelo MRI-ESM2-0 foi classificado como o de pior desempenho.

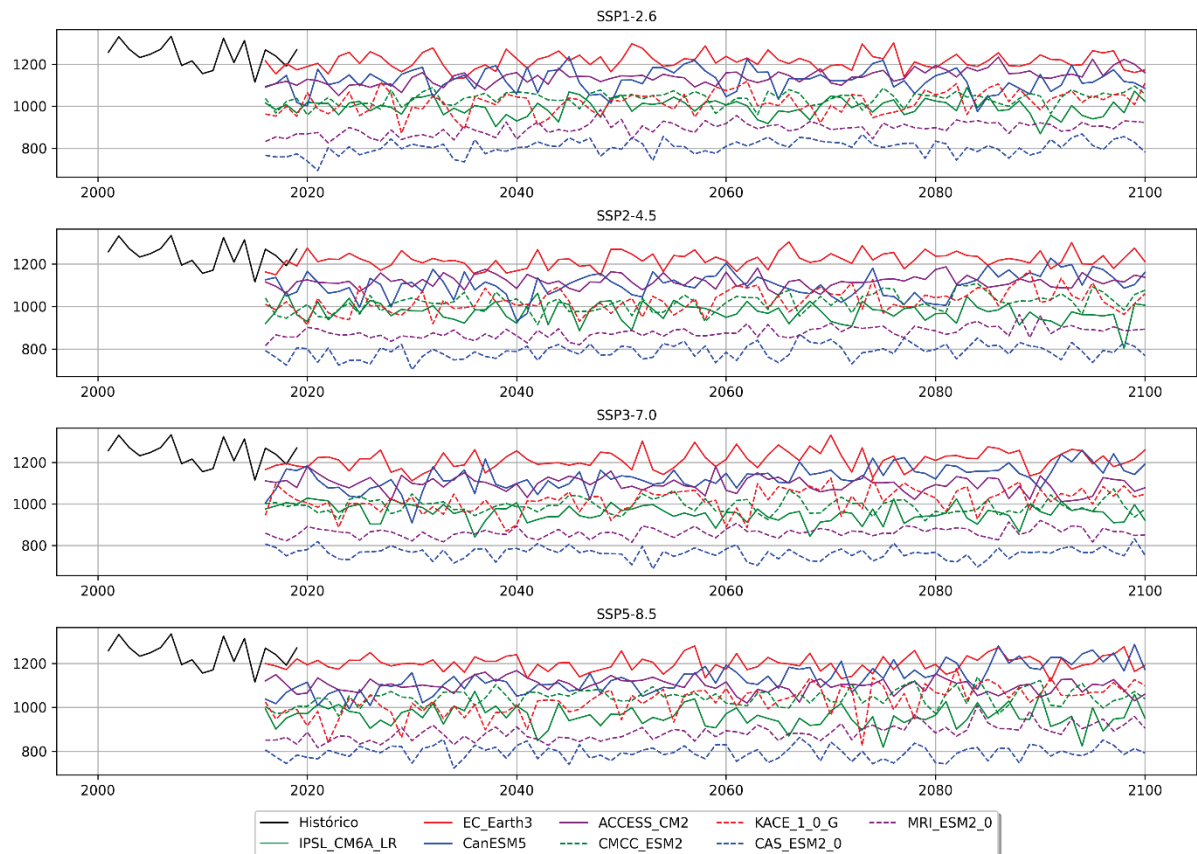
Para os dados de evapotranspiração seguiu-se os mesmos passos dos dados de precipitação, os valores do PBIAS se encontram na TABELA 17.

TABELA 17 - AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DOS MCGs - DADOS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO

CENÁRIO	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5
IPSL_CM6A_LR	20,02	21,02	20,07	23,20
EC_Earth3	4,48	5,08	4,84	3,84
CanESM5	12,13	11,93	11,33	15,18
ACCESS_CM2	11,12	11,72	11,32	10,84
CAS_ESM2_0	38,52	38,04	37,22	37,45
CMCC_ESM2	18,20	21,17	19,67	20,40
KACE_1_0_G	22,18	19,79	17,25	20,51
MRI_ESM2_0	31,59	31,78	32,20	31,62

Diferente do resultado da precipitação os MCGs apresentaram desempenho constante nos diferentes cenários quando analisado a evapotranspiração (FIGURA 9). O modelo EC-Earth3 obteve o melhor desempenho entre os modelos para todos os cenários, sendo ele classificado como muito bom, já os modelos MRI-ESM2-0 e CAS-ESM2-0 obtiveram o pior.

FIGURA 9 - EVAPOTRANSPIRAÇÃO ANUAL ACUMULADA NA BACIA DO MIRINGUAVA POR SSP (2000-2100)



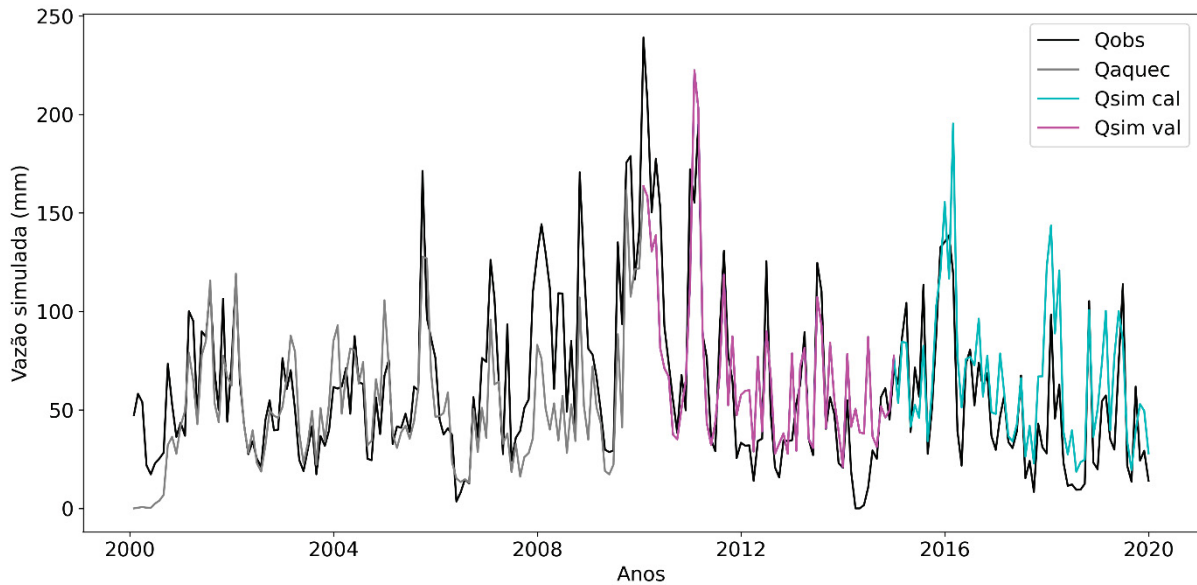
Legenda: Representação gráfica dos dados de evapotranspiração de cada MCG e dados de evapotranspiração históricos observados obtidos de satélite, para cada SSP.

Foram considerados para a precipitação e evapotranspiração os dados mensais acumulados, sendo apenas os gráficos plotados em escala anual.

#### 4.4 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DE VAZÃO COM O GR2M

Os dados de vazão, precipitação e evapotranspiração disponíveis após tratamento, foram utilizados no modelo GR2M. As vazões simuladas para os períodos de aquecimento, calibração e validação são apresentadas na FIGURA 10.

FIGURA 10 - GRÁFICO DE COMPARAÇÃO DA VAZÃO SIMULADA E VAZÃO OBSERVADA

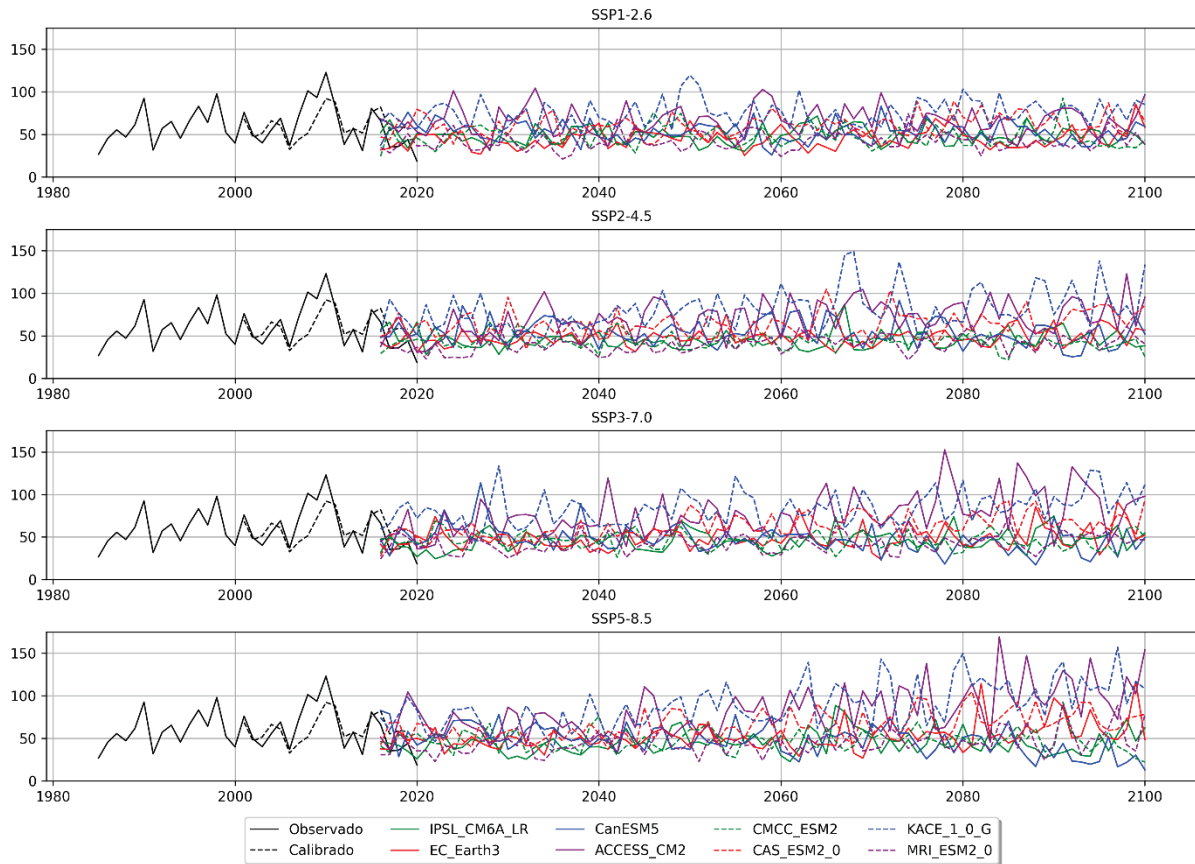


Legenda: Representação gráfica dos dados de vazão simulados pelo modelo GR2M, onde Qobs – Vazão observada obtida pelo HidroWeb, Qaquec – Vazão simulada considerada no aquecimento do modelo, Qsim cal – Vazão simulada na fase de calibração do modelo, Qsim val – Vazão simulada na fase de validação do modelo.

As constantes calibradas pelo modelo foram:  $X_1=2161,8720103831897$  e  $X_2=0,5893778230056468$ . O modelo obteve coeficiente de classificação de desempenho NSE de 0,6020 para o período de calibração e 0,7120 para o período de validação, sendo considerado satisfatório e bom respectivamente, indo de encontro com valores obtidos por estudos semelhantes citados anteriormente.

A FIGURA 11 apresenta as séries de vazão simuladas utilizando os dados observados, os dados dos MCGs e também a vazão observada histórica, por SSP e por MCG. Os dados foram trabalhados utilizando a média mensal, porém para melhor visualização optou-se por plotar gráficos em escala anual.

FIGURA 11 - VAZÃO MÉDIA SIMULADA ANUAL NA BACIA DO MIRINGUAVA (1985-2100) POR SSP



Legenda: Representação gráfica dos dados de vazão simulada para cada MCG e SSP, vazão simulada a partir de dados observados (calibrado) e vazão observada obtida do HidroWeb (observado).

Assim como para a precipitação e evapotranspiração o PBIAS foi calculado para avaliar o desempenho, desta vez, do modelo hidrológico quando utilizado os dados de entrada dos MCGs, o período histórico avaliado continuou sendo de 2016 a 2020.

TABELA 18 - AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO MODELO HIDROLÓGICO COM PBIAS

CENÁRIO	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5
IPSL_CM6A_LR	-26,77	-39,99	6,14	3,97
EC_Earth3	-2,51	-1,61	-2,31	-15,30
CanESM5	-44,59	-31,71	-15,89	-44,67
ACCESS_CM2	-50,93	-25,09	-35,25	-74,74
CAS_ESM2_0	-47,14	-45,28	-23,07	-44,08
CMCC_ESM2	-6,66	0,36	-13,06	-17,65
KACE_1_0_G	-60,07	-69,66	-85,54	-96,29
MRI_ESM2_0	6,07	9,53	-3,79	1,36

O melhor desempenho foi observado utilizando os dados dos MCGs MRI-ESM2-0, com classificação de muito bom em todos os cenários, seguido do EC-Earth3, sendo classificado em sua maioria como muito bom, com exceção apenas para o SSP5-8.5 que obteve classificação satisfatória, o modelo CMCC-ESM2 se manteve na média, com classificação de muito bom, bom e satisfatório, sendo este atribuído ao cenário extremo. O pior desempenho foi obtido com os dados dos MCGs ACCESS-CM2 e KACE-1-0-G onde em todos os SSPs se manteve a classificação insatisfatória, seguido do MCG CanESM5 com igual classificação, com exceção do SSP3-7.0 classificado como satisfatório e do MCG CAS-ESM2-0 com classificação de insatisfatório nos dois primeiros cenários e de satisfatório nos dois mais extremos. O modelo IPSL-CM6A-LR obteve os dois extremos de desempenho, sendo insatisfatório nos dois primeiros SSPs e muito bom nos dois SSPs mais críticos.

#### 4.5 COMPARAÇÃO ENTRE MCGs

Se compararmos os valores obtidos de PBIAS para os modelos selecionados agrupando-os por SSP e variáveis analisadas é possível ter uma visão mais ampla dos resultados obtidos e desempenho geral dos MCGs.

FIGURA 12 - COMPARAÇÃO DE VALORES DE PBIAS POR SSP

SSP1-2.6				SSP2-4.5			
MODELOS	PRECIPITAÇÃO	EVAPOTRANSPIRAÇÃO	VAZÃO SIMULADA	MODELOS	PRECIPITAÇÃO	EVAPOTRANSPIRAÇÃO	VAZÃO SIMULADA
IPSL_CM6A_LR	14.01	20.02	-26.77	IPSL_CM6A_LR	12.79	21.02	-39.99
EC_Earth3	26.26	4.48	-2.51	EC_Earth3	17.75	5.08	-1.61
CanESM5	6.00	12.13	-44.59	CanESM5	9.89	11.93	-31.71
ACCESS_CM2	3.06	11.12	-50.93	ACCESS_CM2	9.97	11.72	-25.09
CAS_ESM2_0	17.85	38.52	-47.14	CAS_ESM2_0	16.89	38.04	-45.28
CMCC_ESM2	20.97	18.20	-5.66	CMCC_ESM2	26.95	21.17	0.36
KACE_1_0_G	3.25	22.18	-60.07	KACE_1_0_G	16.89	19.79	-69.66
MRI_ESM2_0	32.52	31.59	6.07	MRI_ESM2_0	33.14	31.78	9.53
SSP3-7.0				SSP5-8.5			
MODELOS	PRECIPITAÇÃO	EVAPOTRANSPIRAÇÃO	VAZÃO SIMULADA	MODELOS	PRECIPITAÇÃO	EVAPOTRANSPIRAÇÃO	VAZÃO SIMULADA
IPSL_CM6A_LR	25.49	20.07	6.14	IPSL_CM6A_LR	28.76	23.20	3.97
EC_Earth3	22.73	4.84	-2.31	EC_Earth3	13.82	3.84	-15.30
CanESM5	17.78	11.33	-15.89	CanESM5	4.20	15.18	-44.67
ACCESS_CM2	4.88	11.32	-35.25	ACCESS_CM2	-2.25	10.84	-74.74
CAS_ESM2_0	23.29	37.22	-23.07	CAS_ESM2_0	17.74	37.45	-44.08
CMCC_ESM2	20.95	19.67	-13.06	CMCC_ESM2	20.80	20.40	-17.65
KACE_1_0_G	23.29	17.25	-85.54	KACE_1_0_G	17.74	20.51	-86.29
MRI_ESM2_0	27.01	32.20	-3.79	MRI_ESM2_0	29.03	31.62	1.36

Dos resultados obtidos para o SSP1-2.6, os piores foram atribuídos à variável de vazão simulada, onde apesar de a classificação ficar entre “muito bom” e “insatisfatório”, a pior classificação foi predominante e com valores expressivos, sendo o MCG pior classificado o KACE-1-0-G e o melhor, dentro da classificação



“muito bom”, o MCG EC-Earth3. A variável precipitação, assim como a de evapotranspiração, obteve resultados contemplando todas as classificações, sendo a classificação de “muito bom” predominante e o melhor resultado atribuído ao MCG ACCESS-CM2 e o pior, classificado assim como “insatisfatório”, para o MCG MRI-ESM2-0, já para a evapotranspiração a classificação predominante foi a de “satisfatório”, sendo o MCG com o melhor desempenho o EC-Earth3 e o com pior o CAS-ESM2-0. Levando em consideração os resultados e classificações obtidas para as três variáveis, neste cenário o MCG com melhor desempenho foi o EC-Earth3 e com pior desempenho o CAS-ESM2-0.

O SSP2-4.5 apresenta similaridade com o cenário anterior, os MCGs que sofreram mudança de classificação na variável precipitação foram o EC-Earth3, CMCC-ESM2 e KACE-1-0-G, o primeiro melhorando a classificação de “insatisfatório” para “satisfatório” e os dois últimos com uma piora, de “satisfatório” para “insatisfatório” e de “muito bom” para “satisfatório”, respectivamente. Novamente o MCG com melhor desempenho demonstrou ser o EC-Earth3, neste cenário ainda com uma melhor classificação da precipitação, o MCG CAS-ESM2-0 seguiu com pior classificação.

No cenário SSP3-7.0 houve significativa mudança na classificação em todos os MCGs, a precipitação foi a variável com pior classificação em todos os modelos, com exceção do MCG ACCESS-CM2, único com a classificação “muito bom”, os demais ficaram entre “satisfatório” e “insatisfatório”. Os MCGs tiveram melhora de classificação na vazão simulada, com exceção dos MCGs KACE-1-0-G e ACCESS-CM2, que mantiveram a classificação “insatisfatório” e o MCG CMCC-ESM2 que obteve piora na classificação, de “muito bom” para “bom”. A evapotranspiração manteve as classificações do cenário anterior. O MCG EC-Earth3 seguiu apresentando melhor desempenho neste cenário e o MCG CAS-ESM2-0 com o pior.

A variável precipitação, no cenário SSP5-8.5, manteve a classificação do cenário anterior, com exceção dos MCGs EC-Earth3 e CanESM5, que melhoraram sua classificação para “bom” e “muito bom” respectivamente, assim como a evapotranspiração, com apenas o MCG CanESM5 com mudança de classificação de “bom” para “satisfatório”. A vazão simulada sofreu piora na classificação para a maioria dos MCGs, predominando as classes “satisfatório” e “insatisfatório”, este foi o único cenário em que o MCG EC-Earth3 obteve classificação “satisfatório”, diferente dos demais em que seguiu com “muito bom”, mesmo assim considerando as três

variáveis analisadas continua sendo o MCG com melhor desempenho, e os MCGs CAS-ESM2 e KACE-1-0-G com o pior.

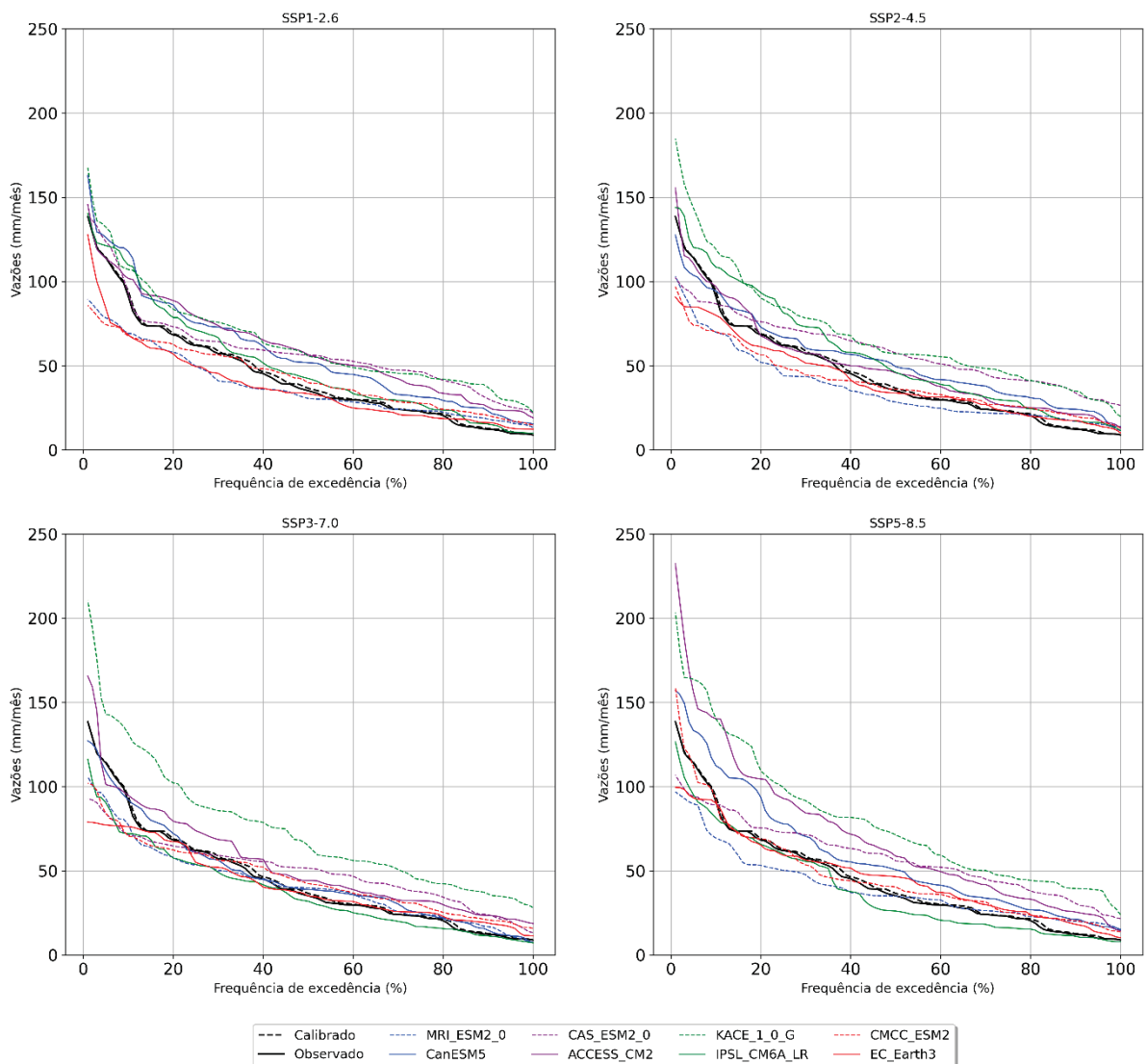
Se tratando de simular vazão futura é importante que se olhe para as variáveis em conjunto, considerar apenas uma variável para avaliar o desempenho dos MCGs para a bacia pode ocasionar uma conclusão equivocada do que é mais representativo. O modelo ACCESS-CM2 obteve classificação constante em todos os cenários, sendo “muito bom” para precipitação e “bom” para a evapotranspiração, entretanto para a vazão simulada manteve a classificação de “insatisfatório”, com valores expressivos, o mesmo ocorre com os MCGs CanESM5, KACE-1-0-G e CMCC-ESM2-0, que em alguns cenários obtiveram classificação mediana para as variáveis de precipitação, mas a pior classificação para a vazão. O contrário também pode ser observado para o MCG MRI-ESM2-0 que em todos os cenários apresentou classificação “muito bom” para a vazão simulada, porém para as demais manteve classificação de “insatisfatório” e com os piores valores atribuídos, se observássemos somente o resultado obtido para a vazão, neste caso, ao construir o balanço hídrico com dados deste modelo teríamos diferenças discrepantes.

Ainda analisando os valores obtidos de PBIAS onde valores negativos indicam superestimação do modelo e positivos subestimação, os dados de todos os MCGs indicam que subestimam os dados observados de precipitação e evapotranspiração, enquanto que os resultados obtidos para a vazão indicam predominantemente superestimação do modelo hidrológico.

#### 4.5 ANÁLISE DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA

Para análise da disponibilidade hídrica se fez uso de curvas de permanência, a FIGURA 13 apresenta as curvas para cada SSP das séries de vazão simuladas com dados calibrados, observados e dos MCGs.

FIGURA 13 - CURVAS DE PERMANÊNCIA (2016-2020)



Legenda: MRI-ESM2-0, CAS-ESM2-0, KACE-1-0-G, CMCC-ESM2, CanESM5, ACCESS-CM2, IPSL-CM6A-LR e EC-EARTH3 - vazão simulada pelo modelo GR2M com os dados dos MCGs. Calibrado - vazão simulada a partir de dados de entrada do satélite MODIS (evapotranspiração) e da plataforma HydroWeb (precipitação). Observado - dados históricos de vazão obtidos da plataforma HydroWeb. O período de dados representado é de 2016 a 2020.

A partir das curvas se obteve para os dados históricos que 50% da vazão simulada  $Q_{95\%}$  é: 5,09 mm/mês e 50% da vazão observada  $Q_{95\%}$  é: 4,83 mm/mês. Os valores obtidos para as vazões simuladas com dados dos MCGs em cada SSP são apresentados na TABELA 19.

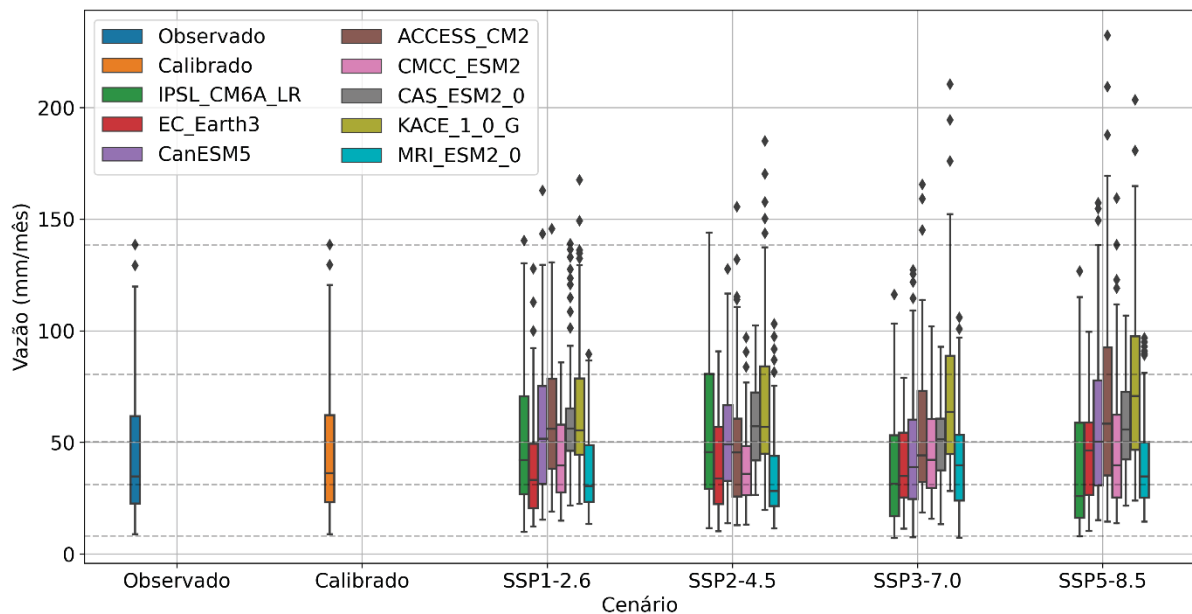
TABELA 19 - VALOR DE 50% DA Q<sub>95%</sub> (mm/mês)

CENÁRIO	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5
IPSL_CM6A_LR	5.28	7.96	4.44	4.59
EC_Earth3	6.30	6.84	7.88	6.48
CanESM5	8.27	10.04	5.59	8.41
ACCESS_CM2	11.64	8.29	10.62	11.08
CAS_ESM2_0	12.50	14.84	9.18	11.92
CMCC_ESM2	8.46	8.19	9.15	8.29
KACE_1_0_G	14.51	14.46	16.67	19.00
MRI_ESM2_0	7.72	7.52	5.22	9.26

No geral os MCGs apresentaram valores acima dos valores obtidos para a vazão observada, sendo os valores dos MCGs IPSL-CM6A-LR e EC-Earth3 os mais aproximados em todos os cenários, o MCG KACE-1-0-G foi o que obteve valores mais elevados.

Os resultados obtidos vão de encontro com o que se espera para a região sul de acordo com o relatório do IPCC e destacado por Rocha (2021), onde espera-se que ocorram com maior frequência fortes chuvas de grande volume, situação já observada em crescimento na região.

FIGURA 14 - COMPARAÇÃO DE DADOS OBTIDOS DE VAZÃO SIMULADA E DADOS OBSERVADOS (2016-2020)



A FIGURA 14 permite a visualização de valores máximos obtidos em cenários futuros para a vazão simulada dos MCGs, também permite visualizar que a maior concentração dos dados, em todos os cenários, segue os limites dos dados observados e calibrados.

## 5 CONCLUSÃO

O estudo buscou comparar o desempenho do modelo hidrológico GR2M quando utilizado dados de precipitação e evapotranspiração de Modelos Climáticos Globais para simulação de vazão futura, para tanto fez-se necessário o tratamento de dados de precipitação observados de início a fim de se garantir o fechamento do balanço hídrico e melhor performance do modelo hidrológico.

As estações de precipitação localizadas dentro da bacia hidrográfica delimitada continham extenso período de falhas de dados, onde com o intuito de preenchimento destas falhas se fez uso de estações auxiliares localizadas no entorno da bacia, foi possível dessa maneira realizar 100% do preenchimento das falhas e assim calcular a média de Thiessen dos dados necessários para o modelo hidrológico.

Para garantir a qualidade dos dados observados foi analisado o balanço hídrico da bacia de estudo que demonstrou a necessidade de aplicação de um fator de correção nos dados de precipitação. O fator de correção de 1.666 demonstrou ser adequado para correção dos dados.

As correções e preenchimentos realizados contribuíram para que se obtivesse um NSE de calibração do modelo GR2M de 0.6030 e de validação de 0.7130, considerados satisfatório de bom respectivamente.

Os dados futuros de precipitação e evapotranspiração, de entrada do modelo hidrológico, foram obtidos de MCGs distintos, os modelos climáticos foram inicialmente selecionados com base na disponibilidade de dados de acordo com critérios definidos como: cenários modelados, período de dados, padrão de simulação e frequência mensal de dados. De 56 MCGs, previamente selecionados, a medida em que iam se aplicando os critérios esta quantidade diminuía, passando no final a ser de 23 MCGs, destes após visualização dos dados e comparação com os dados observados somente oito seguiram no estudo, sendo eles: ACCESS-CM2, CanESM5, EC-Earth3, IPSL-CM6A-LR, CAS-ESM2-0, CMCC-ESM2, KACE-1-0-G e MRI-ESM2-0.

Os modelos foram comparados por SSP e para as variáveis de precipitação, evapotranspiração e vazão simulada, sendo nas duas primeiras variáveis avaliado o desempenho do modelo climático e para a vazão o desempenho do modelo hidrológico. A métrica estatística utilizada para avaliar os modelos e classificá-los foi o PBIAS.

Os modelos climáticos com melhor desempenho considerando as variáveis de precipitação e evapotranspiração foram o EC-Earth3 e ACCESS-CM2, sendo o ACCESS-CM2 o único com melhores resultados em todos os SSPs, permanecendo com a classificação de “muito bom” para a precipitação e de “bom” para a evapotranspiração, e o modelo EC-Earth3 com classificação de “muito bom” para a evapotranspiração em todos os cenários.

Já para a vazão simulada os modelos com melhor desempenho foram o EC-Earth3 e MRI-ESM2-0 em todos os SSPs, IPSL-CM6A-LR nos SSP3-7.0 e SSP5-8.5, e CMCC-ESM2 nos SSP1-2.6 e SSP2-4.5.

Quando avaliadas as três variáveis o MCG com melhor desempenho foi o EC-Earth3 e o com pior desempenho o KACE-1-0-G.

Quanto a disponibilidade hídrica os valores de  $Q_{95\%}$  obtidos para os MCGs indicam que em todos os cenários a vazão se mantém próxima ao calculado para os dados observados e calibrados, indo de encontro ao esperado de acordo com o relatório do IPCC, que prevê para a região sul maior frequência de chuvas extremas.

A motivação do estudo partiu do interesse em se avaliar modelos climáticos que melhor representassem cenários futuros de dados hidrológicos de bacias do Paraná, para isso como bacia experimental foi selecionada a bacia do Miringuava que possui um projeto de implantação de novo reservatório de água para a região metropolitana de Curitiba.

Os resultados obtidos vão de encontro ao que se espera para a região segundo o relatório do IPCC e o desempenho dos modelos climáticos segue o que alguns pesquisadores já concluíram, quando avaliados para aplicação na América do Sul, entretanto se evidencia a necessidade de se avaliar cada variável que compõem o balanço hídrico quando se trata de simulação com modelos hidrológicos, um resultado positivo de uma variável isolada pode representar um falso indicador de qualidade do modelo.

## 6 SUGESTÕES DE CONTINUIDADE

Como sugestão de continuidade considerar:

- Aplicação dos métodos apresentados em bacias de maiores áreas;
- Avaliação de dados históricos simulados por MCGs para comparação com dados observados;
- Emprego de diferentes modelos hidrológicos;
- Avaliação de uso de dados de entrada para modelos hidrológicos combinando apenas dados de MCGs com melhor desempenho;
- Aplicação de correção de BIAS e
- Associação de dados de temperatura a fim de se discutir eventos extremos.



## REFERÊNCIAS

- ALMAGRO, A. et al. Performance evaluation of Eta/HadGEM2-ES and Eta/MIROC5 precipitation simulations over Brazil. **Atmospheric Research**, v. 244, p. 105053, 2020.
- ALSDORF, D. E.; RODRÍGUEZ, E.; LETTENMAIER, D. P. Measuring surface water from space. **Rev. Geophys.**, 45, RG2002. 2007.
- ANA. **Mudanças Climáticas e Recursos Hídricos: avaliações e diretrizes para adaptação**. Brasília: ANA e GGE, 2016.
- BECKIE, R. "Fundamental hydrologic equations". **Encyclopedia of Hydrological Sciences**, Capítulo 5, páginas 59–75. John Wiley & Sons Ltd. 2005.
- BLACK, T. L. The new NMC mesoscale Eta model: Description and forecast examples. **Wea. and Forecasting**, 9, 265-278. 1994.
- BRUTSAERT, W. **Hydrology: an introduction**. Cambridge university press. 2005.
- BYUN, Y. *et al.* NIMS-KMA KACE1.0-G model output prepared for CMIP6 CMIP historical. Version 20190910. **Earth System Grid Federation**. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.8378>. 2019.
- CAMPBELL, J.D. *et al.* Future climate of the Caribbean from a regional climate model. **Int. J. Climatol.** 31, 1866–1878. 2011.
- CHENG, S. L.; HWANG, C. Optimal approximation of linear systems by a differential evolution algorithm, **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans**, v. 31, n. 6, pp. 698-707, 2001.
- CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; LARRY, W. M. **Applied Hydrology**. McGraw-Hill. 1988.
- COMEC. Coordenação da Região Metropolitana de Curitiba. Região Metropolitana de Curitiba (29 municípios). Disponível em: [https://www.comec.pr.gov.br/sites/comec/arquivos\\_restritos/files/documento/2019-11/rmc\\_2013\\_politico.pdf](https://www.comec.pr.gov.br/sites/comec/arquivos_restritos/files/documento/2019-11/rmc_2013_politico.pdf). 2012. Acesso em: 10 ago. 2022.
- CONWAY, D. Water Security in a Changing Climate. In: Lankford, B. et al. (Coord.). **Water Security: Principles, Perspectives and Practices**. London, Routledge. p. 80-100. 2013.
- DIAS, C. G.; REBOITA, M.S. Assessment of CMIP6 Simulations over Tropical South America. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, p. 1282-1295. 2021.
- DUCHON, C. E.; ESSENBERG, G.R. Comparative rainfall observations from pit and aboveground rain gauges with and without wind shields. **Water Resources Research**, 37(12), 3253-3263. 2001.

ENTEKHABI, D., AND COAUTHORS. “**The soil moisture active passive (SMAP) mission**”. Proc. IEEE, 98, 704–716. 2010.

FEOKTISTOV, V. **Differential Evolution in Search of Solutions**. Springer New York, NY. 2006. Disponível em: [https://doi.org/10.1007/978-0-387-36896-2\\_1](https://doi.org/10.1007/978-0-387-36896-2_1). Acesso em: 11 ago. 2022.

FORMIGA-JOHNSSON, R. M.; BRITTO, A. L. Segurança hídrica, abastecimento metropolitano e mudanças climáticas: considerações sobre o caso do Rio de Janeiro. **Ambiente & Sociedade**, v. 23, 2020.

GHIRELLI, M. G., MERCURI, E. G. F. Uso do Modelo GR4J para Estimativa de Vazão na Bacia do Rio Nhundiaquara. **ANALES del XXX Congreso Latinoamericano de Hidráulica – Volúmen 2 – Hidrología Superficial y Subterránea**. Pg 71. 2023.

GROISMAN, P. Y.; LEGATES, D.R. The accuracy of United States precipitation data. **Bulletin of the American Meteorological Society**, 75(2), 215-228. 1994.

GUPTA, H. V. *et.al.* 1999. Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. **J. Hydrologic Eng.** 4(2): 135-143. 1999.

HARLAN, D., WANGSADIPURA, M. AND MUNAJAT C. M. “Rainfall-Runoff Modeling of Citarum Hulu River Basin by Using GR4J”. **World Congress on Engineering**, Vol II, London, U.K. 2010.

HOESUNG, L. *et. al.* **IPCC, 2023: Summary for Policymakers**. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1-34, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001. 2023.

HOELTGEBAUM, L.E.B. **Quantificação dos termos dos balanços de massa e energia na escala da bacia hidrográfica: estudo de caso em Wahoo Creek**. 141 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. Curitiba, Brasil. 2021.

IBGE. 2010. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pr/curitiba/panorama>. Acesso em: 08 ago. 2022.

IPARDES. Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social. Disponível em: [http://www.ipardes.gov.br/imp/imp.php?page=consulta&action=ano\\_save](http://www.ipardes.gov.br/imp/imp.php?page=consulta&action=ano_save). Acesso em: 12 ago. 2022.

KABOUYA, M. **Modélisation pluie-débit aux pas de temps mensuel et annuel en Algérie septentrionale**. Thèse de Doctorat, Université Paris Sud Orsay, 347 pp. 1990.

KABOUYA, M.; MICHEL, C. Estimation des ressources en eau superficielle aux pas de temps mensuel et annuel, application à un pays semi-aride. **Revue des Sciences de l'Eau**. 4(4), 569-587. 1991.

KARL, E. *et al.* **CMIP6 Global Attributes, DRS, Filenames, Directory Structure, and CV's**. Document short URL: <https://goo.gl/v1drZl>. 10 September 2018 (v6.2.7)

KERR, Y. H., AND COAUTHORS. “**The SMOS Mission: New tool for monitoring key elements of the global water cycle**”. *Proc. IEEE*, 98, 666–687. 2010.

KNUTTI, R., SEDLÁČEK, J. Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections. *Nat. Clim. Chang.* 3, 1–5. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/nclimate1716>. Acesso em: 10 ago. 2022.

KUANA, L.A. “**Regionalização de parâmetros do modelo GR4J para a previsão de vazão diária em bacias não monitoradas**”. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental (PPGEA). Universidade Federal do Paraná. 2022.

LARSON, L.W.; Peck, E. L. Accuracy of precipitation measurements for hydrologic modeling. *Water Resources Research*, 10(4), 857-863. 1974.

LEGATES, D.R.; DELIBERTY, T. L. Precipitation measurement biases in the United States 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 29(5), 855-861. 1993.

LORENZ, C. *et al.* “Large-scale runoff from landmasses: a global assessment of the closure of the hydrological and atmospheric water balances”. *Journal of Hydrometeorology*, 15(6), 2111-2139. 2014.

LOVATO, T. *et al.* CMIP6 Simulations With the CMCC Earth System Model (CMCC-ESM2). *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. <https://doi.org/10.1029/2021MS002814>. First published: 10 February 2022.

MAGAÑA, V.; CAETANO, E. Temporal evolution of summer convective activity over the Americas warm pools. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L02803. 2005.

MAKHLOUF, Z. **Compléments sur le modèle pluie-débit GR4J et essai d'estimation de ses paramètres**. Thèse de Doctorat, Université Paris XI Orsay, 426 pp. 1994.

MAKHLOUF, Z.; MICHEL, C. A two-parameter monthly water balance model for French watersheds. *Journal of Hydrology* 162, 299-318. 1994.

MARTIN, G.M.; BELLOUIN, N.; COLLINS, W.J.; CULVERWELL, I.D.; HALLORAN, P.R. *et al.* The HadGEM2 Family of Met Office Unified Model Climate Configurations. *Geoscientific Model Development*, v. 4, p. 723-757, 2011.

MASSON-DELMOTTE, V. *et al.* **IPCC, 2021: Summary for Policymakers**. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. In Press. 2021.

MELLO, K., TANIWAKI, R. H., PAULA, F. R., VALENTE, R. A., RANDHIR, T. O., MACEDO, D. R. E HUGHES, R. M. "Multiscale land use impacts on water quality: Assessment, planning, and future perspectives in Brazil". **Journal of Environmental Management**, 270, 110879. 2020.

MENDEZ, M. *et. al.* Hydrological Response of Tropical Catchments to Climate Change as Modeled by the GR2M Model: A Case Study in Costa Rica. **Sustainability**, 14, 16938. <https://doi.org/10.3390/su142416938>. 2022.

MESINGER, F.; JANJIC, Z. I.; NICKOVIC, S.; GAVRILOV, D.; DEAVEN., E D. G. **The step-mountain coordinate: Model description and performance for cases of Alpine lee cyclogenesis and for a case of Appalachian redevelopment**. *Mon. Wea. Rev.*, 116, 1493-1518. 1988.

MMA. **Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima**. Vol. 2 [...]. Brasília: MMA, 2016.

MORIASI, D. N. *et. al.* (2007). "Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations." **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 3, p. 885-900. 2007.

MOUELHI, S. **Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier**. Thèse de Doctorat, ENGREF, Cemagref Antony, France, 323 pp. 2003.

MOUELHI, S., *et.al.*, Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model. **Journal of Hydrology** 318(1-4), 200-214, doi:10.1016/j.jhydrol.2005.06.014. 2006.

PARKINSON, C. "Aqua: An earth-observing satellite mission to examine water and other climate variables". **IEEE Trans. Geo- sci. Remote Sens.**, 41, 173–183. 2003.

PERRIN, C., MICHEL, C.; ANDRE´ASSIAN, V. "Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation". **Journal of Hydrology** 279, pp. 275–289. 2003.

ROCHA, V. M. Um breve comentário a respeito do IPCC AR6. **Revista Entre-Lugar**, V. 13, n.24, 2021 - ISSN 2176-9559, 2021.

SADIO, C. A. A. *et al.* Hydrological response of tropical rivers basins to climate change using the GR2M model: the case of the Casamance and Kayanga-Géva rivers basins. **Environmental Sciences Europe**. <https://doi.org/10.1186/s12302-023-00822-4>. 2023.

SANEPAR - Companhia de Saneamento do Paraná. **Plano Diretor SAIC: Sistema de Abastecimento de Água Integrado de Curitiba e Região Metropolitana**. Curitiba: Sanepar, 2013.

SEARCY, J.K., HARDISON, C.H. Double-mass curves (No. 1541). **US Government Printing Office**. 1960.

SILVA, B. M. B.; SILVA, D. D. e MOREIRA, M. C. Influência da sazonalidade das vazões nos critérios de outorga de uso da água: estudo de caso da bacia do rio Paraopeba. **Revista Ambiente & Água**, 10(3), 623-634. <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.1587>. 2015.

SILVA, A. C. G. **Avaliação de métodos para a regionalização de curvas de permanência de vazões na bacia do rio Iguazu - Paraná**. 138 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel - Paraná, 2022.

SCHMIDT, R. *et al.* “Hydrological signals observed by the GRACE satellites”. **Surv. Geophys.**, 29, 319–334. 2008.

SIFUENTES *et al.* The Impact of Climate Change on Evapotranspiration and Flow in a Major Basin in Northern Mexico. **Sustainability**, 15(1), 847; <https://doi.org/10.3390/su15010847>. 2023.

STORN, R.; PRICE, K. Differential evolution - A simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. **J. Global Optimiz**, v. 11, pp. 341–359, 1997.

SWART, N.C., *et al.* CCCma CanESM5 model output prepared for CMIP6 CMIP historical. Version 20190429. **Earth System Grid Federation**. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.3610>. 2019.

TAYLOR, K.E.; STOUFFER, R.J., MEEHL, G. A. An overview of CMIP5 and the experiment design. **Bull. Am. Meteorol. Soc.** **93**, 485–498. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>. Acesso em: 07 ago. 2022.

TOPALOVIC, Ž.; TODOROVIC, A.; PLAVŠIĆ, J. Evaluating the Transferability of Monthly Water Balance Models under Changing Climate Conditions. **Hydrol. Sci. J.** 65, 928–950. 2020.

WILBY, R. L. Evaluating climate model outputs for hydrological applications. **Hydrological Sciences Journal**, v. 55, n. 7, p. 1090-1093, 2010.

YUKIMOTO, S., *et al.* MRI MRI-ESM2.0 model output prepared for CMIP6 CMIP historical. Version 20190222. **Earth System Grid Federation**. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.6842>. 2019.

ZHANG, H. *et al.* Description and Climate Simulation Performance of CAS-ESM Version 2. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems** <https://doi.org/10.1029/2020MS002210>. First published: 24 October 2020.