

SEGURANÇA HÍDRICA E MUDANÇAS CLIMÁTICAS: uma caracterização hidrológica para a bacia do rio Verde Grande

*Water security and climate change: a hydrological characterization for the Verde Grande
river basin*

Rafaela de Mauro Tortorelli¹

Celso Bandeira de Melo Ribeiro^{2*}

Daniele Feitoza Silva³

Eduarda Trindade Filgueiras⁴

Paula Roberta Souza Carvalho⁵

Leonardo Goliatt da Fonseca⁶

Welson de Avelar Soares Filho⁷

¹ MBA em Planejamento e Controle de Obras Públicas pela Universidade Iguazu. Graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). – e-mail: rafaela.tortorelli@engenharia.ufjf.br

² Doutorado em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa (UFV). Mestrado em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). Professor Associado do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (ESA) da UFJF. – e-mail: celso.bandeira@ufjf.br. Autor correspondente*

³ Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Mestrado em Ciências pela Universidade de São Paulo (USP). Graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Alagoas (UFAL). – e-mail: pariconha@gmail.com

⁴ Graduanda em Engenharia Ambiental e Sanitária pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). – e-mail: eduarda.filgueiras@engenharia.ufjf.br

⁵ Mestranda em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). Pós-graduação em Engenharia de Estruturas pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC-Minas). Graduação em Engenharia Ambiental e Engenharia Civil pela Universidade FUMEC. – e-mail: paula.carvalho@engenharia.ufjf.br

⁶ Doutorado em Modelagem Computacional pelo Laboratório Nacional de Computação Científica (LNCC). Graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). Coordenador dos programas de pesquisa da Pró-reitora de Pós-graduação e Pesquisa da UFJF. – e-mail: leonardo.goliatt@ufjf.br

⁷ Graduação em Ciência da Computação pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). Analista em Tecnologia da Informação pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sudeste de MG (IF Sudeste MG). – e-mail: wfilho@ice.ufjf.br

RESUMO

As mudanças climáticas podem intensificar a frequência e magnitude dos eventos extremos regionais, como secas prolongadas em áreas áridas e chuvas intensas em regiões úmidas, exigindo um gerenciamento de recursos hídricos que contemple futuros cenários climáticos. Neste contexto, o presente estudo tem como objetivo avaliar as consequências das mudanças climáticas sobre o regime pluviométrico na Bacia do Rio Verde Grande utilizando dados provenientes de três modelos de circulação global: BESM, HadGEM 2-ES e MIROC 5. A metodologia visa estimar equações de intensidade-duração-frequência (IDF) com base em dados projetados para o futuro e compará-las com as equações IDF obtidas a partir de dados observados. Para simular as condições climáticas da bacia no futuro, foram utilizados dois cenários RCP (*Representative Concentration Pathways*) conforme a evolução das emissões de gases de efeito estufa: o RCP 4.5, caracterizado pela estabilização das emissões, e o RCP 8.5, caracterizado pelo aumento contínuo dessas emissões de gases de efeito estufa. Os resultados encontrados indicam reduções nos valores de precipitações máximas diárias e nos totais anuais para as projeções climáticas na Bacia do Rio Verde Grande. O modelo de projeção climática MIROC 5 apresentou os resultados mais pessimistas, onde a variação na média dos totais anuais de precipitação mostrou uma redução de 50,51% para o RCP 4.5 e de 62,36% para o RCP 8.5. Tais dados são alarmantes, pois indicam que as mudanças climáticas podem levar a uma redução significativa nas vazões dos cursos de água da Bacia, além de possíveis impactos na recarga de reservatórios subterrâneos.

Palavras-chave: IDF (Intensidade-Duração-Frequência); Eventos extremos; Gestão de recursos hídricos; Precipitação; Modelos climáticos.

ABSTRACT

Climate change may intensify the frequency and magnitude of regional extreme events, such as prolonged droughts in arid regions and intense rainfall in humid areas, requiring water resource management to consider future climate scenarios. In this context, this study aims to evaluate the impacts of climate change on the rainfall regime in the Verde Grande River basin, using data from three global circulation models: BESM, HadGEM 2-ES, and MIROC 5. The methodology involves estimating intensity-duration-frequency (IDF) equations based on future projected data and comparing them to IDF equations derived from observed data. Two Representative Concentration Pathways (RCPs) were used to simulate future climate conditions based on greenhouse gas emissions: RCP 4.5, characterized by stabilized emissions, and RCP 8.5, characterized by a continuous increase in emissions. The results indicate reductions in maximum daily precipitation values and annual totals in the climate projections for the Verde Grande River basin. The MIROC 5 climate model presented the most pessimistic results, showing a decrease of 50.51% in average annual precipitation totals for RCP 4.5 and 62.36% for RCP 8.5. These findings are alarming as they indicate that climate change could

significantly reduce river flow rates in the basin, in addition to potentially impacting groundwater recharge in reservoirs.

Keywords: *IDF (Intensity-Duration-Frequency); Extreme events; Water resources management; Precipitation; Climate models.*

Data de submissão: 03/07/2024

Data de aprovação: 09/10/2024

1 INTRODUÇÃO

A bacia do Rio Verde Grande, afluente da margem direita do Rio São Francisco, desempenha um papel fundamental no abastecimento hídrico da população, nas atividades agrícolas, pecuárias e industriais da região. Entretanto, há muitos anos a bacia do rio Verde Grande já enfrenta uma demanda de água que supera a disponibilidade hídrica superficial, culminando em um quadro de escassez hídrica (Agência Nacional de Águas - ANA, 2013).

De acordo com Sá *et al.* (2018), a escassez hídrica na bacia do rio Verde Grande é resultante do clima do semiárido brasileiro, caracterizado por meses de seca prolongada, impactando a população e as atividades econômicas locais. Ademais, os impactos dos períodos de estiagem se intensificam pelo aumento da demanda por água, a ausência de planejamento e controle adequados sobre o uso dos recursos hídricos, a remoção da vegetação nativa e a degradação do solo (Albuquerque *et al.*, 2018).

Segundo o *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2021), o aumento das emissões de gases de efeito estufa tem causado alterações significativas nas variáveis do clima, intensificando o aquecimento global e as mudanças climáticas. Essas alterações têm potencial para alterar no futuro a magnitude e a frequência de eventos hidrológicos extremos, como períodos prolongados de seca ou precipitações intensas.

Diante desse cenário, o problema de pesquisa deste estudo consiste na necessidade de compreender se as mudanças climáticas podem agravar a crise hídrica na Bacia do Rio Verde Grande. Assim, o objetivo geral é investigar como as mudanças climáticas afetam o regime pluviométrico da região. Além disso, visa-se a obtenção e comparação das curvas Intensidade-

Duração-Frequência (IDF) atuais e projetadas para a bacia do rio Verde Grande, uma vez que fornecem dados importantes para o planejamento e gestão de recursos hídricos e permitem uma melhor compreensão dos padrões de precipitação e suas variações ao longo do tempo.

Para o desenvolvimento do estudo utilizou-se dos modelos de circulação global (GCMs) para simular a dinâmica do clima da Terra, permitindo prever como as condições climáticas podem evoluir ao longo do tempo sob diferentes cenários de emissões de gases de efeito estufa. Neste estudo, adotou-se dois *Representative Concentration Pathways* (RCPs) que ilustram diferentes cenários de mudança climática em função das emissões de gases de efeito estufa: o RCP 4.5 (cenário intermediário em que as emissões globais começam a ser reduzidas em torno de 2040) e o RCP 8.5 (cenário de altas emissões contínuas).

Por fim, ressalta-se a relevância desta pesquisa pela importância em entender os impactos futuros das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos, especialmente em regiões vulneráveis como a bacia do rio Verde Grande. Os resultados poderão subsidiar ações de planejamento e gestão hídrica, contribuindo para a mitigação de conflitos entre usuários e a preservação dos recursos naturais.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Modelos climáticos

As mudanças climáticas são capazes de desencadear variações nos padrões climáticos, como a temperatura média e a intensidade e frequência de eventos climáticos extremos. Nesse contexto, é crucial salientar que as mudanças nas condições climáticas são influenciadas pelo volume de emissões de gases e os impactos resultantes variam de acordo com a localidade.

Assim, surgiram métodos de modelagem climática que empregam modelos matemáticos para reproduzir os mecanismos subjacentes nas interações entre a atmosfera, os oceanos, a superfície terrestre e o ecossistema global (IPCC, 2021). O *Coupled Model Intercomparison Projects* (CMIP) representa uma iniciativa que congrega uma variedade de modelos climáticos desenvolvidos por grupos de pesquisa em escala global, facilitando a

compreensão e previsão das dinâmicas climáticas globais, permitindo ainda a comparação direta de resultados entre diferentes modelos (Silva, 2022).

Vale ressaltar que os Modelos de Circulação Global (GCMs) permitem realizar projeções climáticas baseadas em diferentes cenários de emissões de gases de efeito estufa, variando de mais otimistas a mais pessimistas. Isso ocorre porque as concentrações atmosféricas desses gases podem ser estabilizadas ou continuar a aumentar ao longo das projeções futuras. Esses cenários são denominados *Representative Concentration Pathways* (RCPs). Ressalta-se que o RCP 8.5 representa o cenário com maior nível de emissões, sendo considerado o mais pessimista, enquanto os cenários RCP 4.5 e RCP 2.6 são vistos como mais otimistas.

2.2 Equações IDF

A relação Intensidade-Duração-Frequência (IDF), comumente referida como equação de chuva intensa, assume um papel de extrema importância no contexto do planejamento e dimensionamento de infraestruturas de drenagem urbana, sistemas de esgoto e na gestão de recursos hídricos. Isso se deve ao fato de que tais equações têm a capacidade de estimar os eventos climáticos extremos que podem desencadear desastres, tais como inundações e enchentes (Calado *et al.*, 2020).

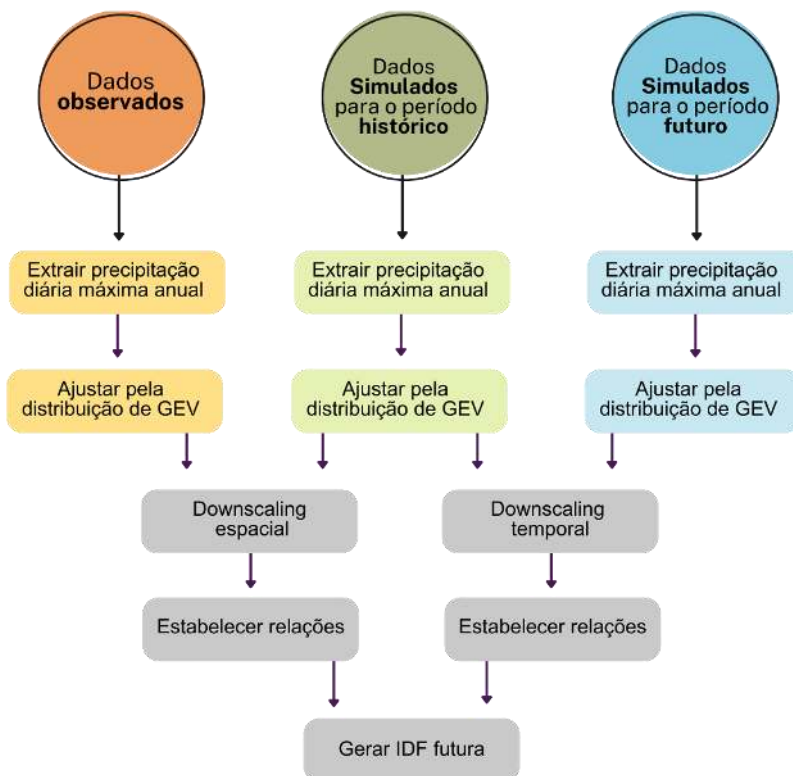
Segundo Lanna (2009), os eventos de máxima precipitação podem ser estimados por meio da extrapolação dos dados observados, conduzido por métodos estatísticos como a distribuição de Gumbel, a Distribuição Generalizada de Valores Extremos (GEV), entre outros. Por intermédio dessas distribuições estatísticas, torna-se possível a geração das curvas IDF, as quais representam a relação entre a intensidade da precipitação, a duração e a frequência dos eventos.

Atualmente, há uma discussão em torno da aplicação de abordagens alternativas, visto que as curvas IDF estimadas com base em dados observados pressupõem que as propriedades estatísticas da precipitação permanecem constantes ao longo do tempo. Assim, a utilização exclusiva de dados observados para desenvolver as curvas IDF pode resultar em subestimação ou superestimação das características dos eventos de precipitação extrema, sobretudo em áreas urbanizadas (Silva, 2022).

Portanto, é prudente conduzir estudos adicionais para avaliar de que forma as mudanças climáticas podem impactar as precipitações e gerar as curvas IDF baseadas em projeções futuras dos modelos climáticos. No entanto, é importante considerar que os dados disponibilizados pelos modelos climáticos frequentemente apresentam baixa resolução espacial. Nesse sentido, torna-se necessário adotar a metodologia proposta por Schardong *et al.*, (2014) para aplicar os dados dos modelos climáticos na elaboração de curvas IDF com projeções futuras (FIGURA 1).

Para ajustar as características locais ou regionais das séries de dados observados às projeções dos modelos climáticos, é necessário aplicar o Método da Correspondência de Quantis Equidistantes, também conhecido como *downscaling* estatístico (Sabóia, 2016). Este método estabelece uma relação entre os quantis equidistantes (pontos específicos na distribuição de probabilidade) das séries de dados do modelo climático e as observações.

Figura 1 – Metodologia para adaptação das IDF's para projeções futuras



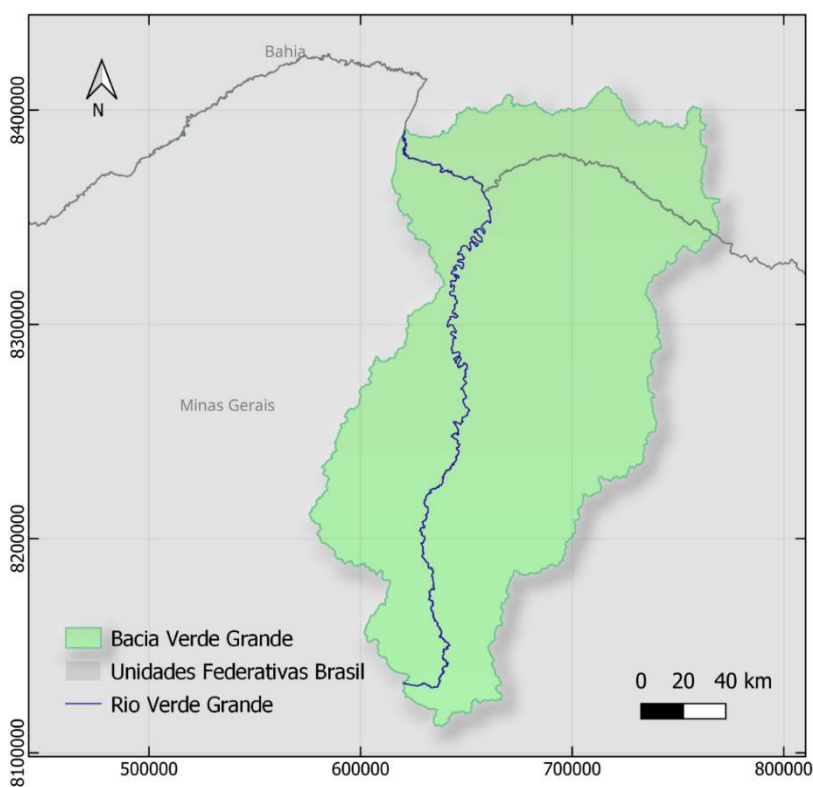
Fonte: Adaptado de SCHARDONG *et al.* (2014)

2.3 Caracterização da Área de Estudo

A bacia do rio Verde Grande, localizada na mesorregião hidrográfica do médio São Francisco, abrange aproximadamente 30.420 km² e inclui 37 municípios (MAPA 1). A distribuição da área por estado é de 87% em Minas Gerais e 13% na Bahia (ANA, 2013). O clima na região é caracterizado como tropical quente e úmido com longos períodos sem chuva, classificado como tipo Aw pela classificação climática de *Köppen* (ANA, 2013).

A região abriga os biomas do cerrado, conhecido por sua vegetação diversificada adaptada ao clima sazonal, e da caatinga, conhecido por suas características de adaptação ao semiárido. As atividades econômicas incluem agricultura, pecuária, mineração, comércio, serviços, indústria e geração de energia, com destaque para a produção de cana-de-açúcar, milho e soja (Comitê de Bacia Hidrográfica do Verde Grande, 2021).

Mapa 1 – Localização da bacia do rio Verde Grande



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

A bacia do rio Verde Grande é essencial para as atividades econômicas da região, especialmente a agricultura, pecuária e indústria, que dependem da água. Contudo, a crescente demanda hídrica somada à irregularidade das chuvas, aumentam os conflitos pelo uso da água, ameaçando tanto o desenvolvimento econômico quanto o abastecimento da população.

Apesar da existência de um Plano de Recursos Hídricos para a bacia do rio Verde Grande, elaborado pela ANA em 2013, é fundamental atualizar as informações hidrológicas disponíveis, uma vez que os dados foram compilados entre 2009 e 2013. Essa atualização é especialmente relevante, pois, conforme indicado por Albuquerque *et al.* (2018), os comportamentos das vazões do rio estão mais intimamente relacionados às precipitações da região e são pouco impactados pela modificação do uso e ocupação do solo.

Nesse contexto, destaca-se uma lacuna significativa na literatura sobre a bacia do rio Verde Grande: a necessidade de investigar como as mudanças climáticas podem influenciar os padrões de precipitação e, conseqüentemente, o comportamento das vazões na região.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Obtenção de dados

Os dados pluviométricos empregados neste estudo podem ser classificados em três grupos diferentes: dados gerados por satélites (1981-2023) com base em dados observados, dados gerados por modelos climáticos no tempo histórico (1981-2005) e dados gerados por modelos climáticos para o tempo futuro (2006-2050).

A partir da delimitação da bacia do rio Verde Grande, foram coletados os dados de precipitação com base em dados observados utilizando o *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations* (CHIRPS) via *Google Earth Engine* (GEE) no período de 1981 a 2023. O estimador de chuva por satélite do CHIRPS representa um conjunto de dados primordialmente concebido para analisar os impactos da seca e avaliar potenciais efeitos na produção agrícola (Funk *et al.*, 2015). O conjunto de dados abarca informações a partir do ano de 1981, integrando médias de precipitação obtidas por satélite, dados fisiográficos e registros provenientes de estações meteorológicas (Brito, 2020).

Para o clima futuro, foram empregados dados disponibilizados por Tavares *et al.* (2023). Esses dados resultam da regionalização (*downscaling*) do modelo climático Eta, realizada por meio do Mapeamento Quantil Empírico das simulações climáticas do Modelo Eta/INPE. A resolução espacial adotada foi de grade regular de 0,2 x 0,2 graus. Por meio do *script* disponibilizado por Tavares *et al.* (2023), a extração dos dados dos modelos climáticos foi conduzida em *Python* no ambiente do *Google Colaboratory*.

Os modelos climáticos do CMIP 5 utilizados neste estudo foram: BESM (*Brazilian Earth System Model*), HadGEM2-ES (*Hadley Centre Global Environmental Model*) e MIROC5 (*Model for Interdisciplinary Research, version 5*). Para o período futuro, as projeções climáticas levaram em consideração dois cenários de concentração dos gases de efeito estufa, RCP 4.5 e RCP 8.5.

A escolha dos modelos climáticos neste estudo se justifica por suas características complementares. O BESM, foi desenvolvido especificamente para o contexto brasileiro, é adequado para captar as particularidades do clima local. Já o HadGEM2-ES, destaca-se pela simulação de processos climáticos complexos, como a interação entre atmosfera e superfície terrestre. O MIROC5 é eficaz na representação de eventos extremos, como secas e chuvas intensas. A combinação desses modelos permite uma análise mais robusta e abrangente das projeções climáticas para a bacia do rio Verde Grande.

3.2 Obtenção das curvas IDF

A Figura 2 apresenta a metodologia para obtenção das curvas IDF para cada um dos três grupos de dados: dados gerados por satélites (1981-2023), dados gerados por modelos climáticos no tempo histórico (1981-2005) e dados gerados por modelos climáticos para o tempo futuro (2006-2050).

Após a compilação dos dados pluviométricos foram identificados os eventos de precipitação diária máxima mensal e calculadas suas frequências de ocorrência, representando assim a distribuição empírica dos dados (FIGURA 2).

Figura 2 – Metodologia da obtenção das curvas IDF



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

No entanto, devido às limitações referentes ao tamanho da amostra e à natureza aleatória dos dados observados, é possível que alguns eventos não tenham sido registrados. Portanto, torna-se imprescindível aplicar as distribuições teóricas de probabilidade para extrapolar os dados observados, garantindo assim a confiabilidade na estimativa das precipitações máximas (Naghetini; Pinto, 2007). Assim, conforme a Figura 2, aplicou-se a distribuição teórica de probabilidade por meio da Generalizada de Valores Extremos (GEV) para cada um dos grupos de dados.

Além disso, empregou-se um teste de aderência com o propósito de avaliar a confiabilidade do ajuste do modelo de distribuição de probabilidades em relação à distribuição empírica (Tucci, 2009).

3.3 Distribuição Empírica e Teórica

Inicialmente, os valores máximos de precipitação diária para cada ano hidrológico entre 1981 e 2023 foram organizados. Em seguida, os eventos hidrológicos observados foram ordenados em ordem decrescente. Com base na posição relativa do valor anual máximo de precipitação diária (i) em relação ao número total de amostras (N), as frequências de não-excedência ($F_{observada}$) dos eventos foram calculadas pela Equação 1.

$$F_{observada} = \frac{i}{N + 1} \quad (1)$$

Os dados coletados pela distribuição empírica foram adaptados às funções cumulativas de probabilidade nos modelos Gumbel, Normal e Generalizada de Valores Extremos (GEV). Segundo Naghettini e Pinto (2007), a distribuição teórica de Gumbel para valores máximos (Equação 2) é expressa em termos dos parâmetros de ajuste (β e α) e o valor da variável hidrológica (x).

$$F(x) = \exp \left[- \exp \left(\frac{x - \beta}{\alpha} \right) \right] \quad (2)$$

Os parâmetros β e α foram calculados por meio do método dos momentos pelo *Excel*, como demonstrado nas Equações 3 e 4, utilizando a média (\bar{x}) e o desvio padrão (s) dos dados de precipitação diária máxima anual observados.

$$\alpha = \frac{s \cdot \sqrt{6}}{\pi} \quad (3)$$

$$\beta = \bar{x} - 0,777216 \cdot s \quad (4)$$

A distribuição Normal Padrão descreve o comportamento de uma variável contínua aleatória que varia de forma simétrica em torno de um valor central (Naghettini e Pinto, 2007). A função de probabilidade acumulada (F_z) para a distribuição Normal Padrão (Equação 5) usa como parâmetro a normal central reduzida (Equação 6). Para este estudo, os parâmetros da distribuição Normal Padrão foram calculados pelo *Excel*.

$$F(z) = \phi = \int \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left(-\frac{z^2}{2} \right) dz \quad (5)$$

$$z = \frac{x - \bar{x}}{s} \quad (6)$$

A Generalizada de Valores Extremos (GEV) é uma distribuição de probabilidade teórica que utiliza três parâmetros principais: Localização (β), Escala (α) e Forma (K). Nesta distribuição, o parâmetro de localização indica a posição característica da distribuição; o parâmetro de escala descreve a extensão da dispersão na distribuição; o parâmetro de forma determina o comportamento da cauda da distribuição (Silva, 2022). Conforme Lanna (2009), a distribuição de GEV é adotada para representar fenômenos que exibem uma evidente assimetria em sua distribuição (Equação 7). Para este estudo, os parâmetros da distribuição de GEV foram obtidos em ambiente RStudio através do pacote *Extremes*.

$$F(y) = \exp \left\{ - \left[1 - k \left(\frac{y - \beta}{\alpha} \right) \right]^{\frac{1}{k}} \right\} \quad (7)$$

3.4 Teste de Aderência

A fim de verificar o ajuste dos modelos de probabilidade à série de dados em estudo, aplicou-se o teste de *Kolmogorov-Smirnov* (KS). O teste estatístico rejeita, ou não, a hipótese de que a distribuição teórica representa as precipitações máximas anuais da área em estudo. Para avaliar a adequação dos modelos de probabilidade à série de dados sob investigação, empregou-se o teste de KS com um nível de significância de 5%. De acordo com Naghettini e Pinto (2007), o teste de KS avalia a maior diferença absoluta entre as frequências obtidas pela distribuição empírica e pelas distribuições teóricas (Equação 8).

$$D_N = \max_{-\infty < X < \infty} |F_{emp}(x) - F_{teo}(x)| \quad (8)$$

Para que a distribuição não seja rejeitada, o valor D_N é confrontado com um valor crítico recomendado pelo teste de *Kolmogorov-Smirnov*, conforme definido na Equação 9. A variável N representa o número de dados da amostra.

$$D_N = \frac{1,63}{\sqrt{N}} \quad (9)$$

Essa análise é válida para um nível de significância de 5% e uma amostra contendo mais de quarenta dados. Se o valor $D N$ obtido for menor que o valor crítico, isso indica que a distribuição teórica de probabilidade se ajusta bem à distribuição empírica.

3.5 Desagregação de chuvas

Com base na distribuição de probabilidade teórica que melhor se ajusta aos dados, estima-se as precipitações máximas diárias para diferentes períodos de retorno. Neste estudo, adotou-se os períodos retorno de 2, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 50, 75 e 100 anos. Em seguida, tais dados podem ser convertidos em precipitações de menor duração utilizando os coeficientes de desagregação, conforme sugerido pela Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental (CETESB, 1986). Neste estudo, selecionou-se as durações de 5, 10, 15, 20, 25, 30, 60, 360, 480, 720 e 1440 minutos.

3.6 Equação IDF

Com os dados de intensidade de precipitação para cada duração e período de retorno é possível ajustar os parâmetros a , b , c e d da Equação 10 por meio do pacote *Solver* do *Microsoft Excel*. Para a avaliação dos modelos, foram considerados o coeficiente de determinação ajustado (R^2) e o erro absoluto médio produzido pelos modelos em relação aos dados originais.

$$i = \frac{K \cdot TR^a}{(b + t_d)^c} \quad (10)$$

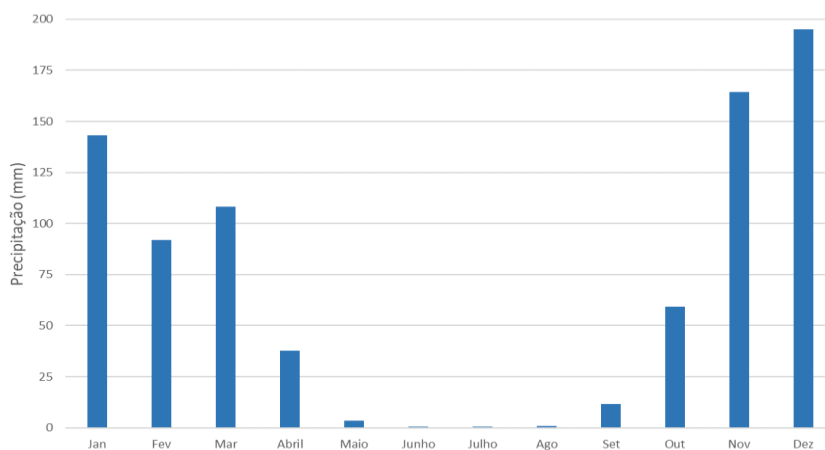
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Regime Pluviométrico

Para entender o comportamento pluviométrico específico da bacia do rio Verde Grande, é necessário analisar os dados pluviométricos históricos, incluindo padrões de

precipitação, sazonalidade, eventos extremos e tendências a longo prazo. Com base os dados de satélite fornecidos pelo CHIRPS, as precipitações médias mensais na bacia entre 1981 e 2023 evidenciam a presença de uma estação seca, caracterizada por pouca ou nenhuma precipitação, e uma estação chuvosa que se estende de outubro a março, durante a qual aproximadamente 93% da precipitação anual (GRÁFICO 1).

Gráfico 1 – Precipitações médias mensais na bacia (1981-2023)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

4.2 Precipitações máximas dos dados de satélites

Em relação ao ano hidrológico, os registros das maiores precipitações diárias segundo os dados de satélites para a bacia do rio Verde Grande foram compilados entre o intervalo de janeiro de 1981 a junho de 2023. Nesse período, observa-se como maior valor 76,8 mm em 2022 e o menor 25,2 mm em 1984. A média das precipitações máximas diárias anuais é de 40,6 mm, com desvio padrão de 9,8 mm.

Os parâmetros de ajuste obtidos para as funções das distribuições foram: $\alpha = 9,01$, $\beta = 35,32$ e $K = -0,08$ para Generalizada de Valores Extremos (GEV); $\alpha = 7,66$, $\beta = 36,26$ para *Gumbel*; e $\bar{x} = 40,68$ e $\sigma = 9,83$ para Normal, associados à série histórica das precipitações máximas anuais.

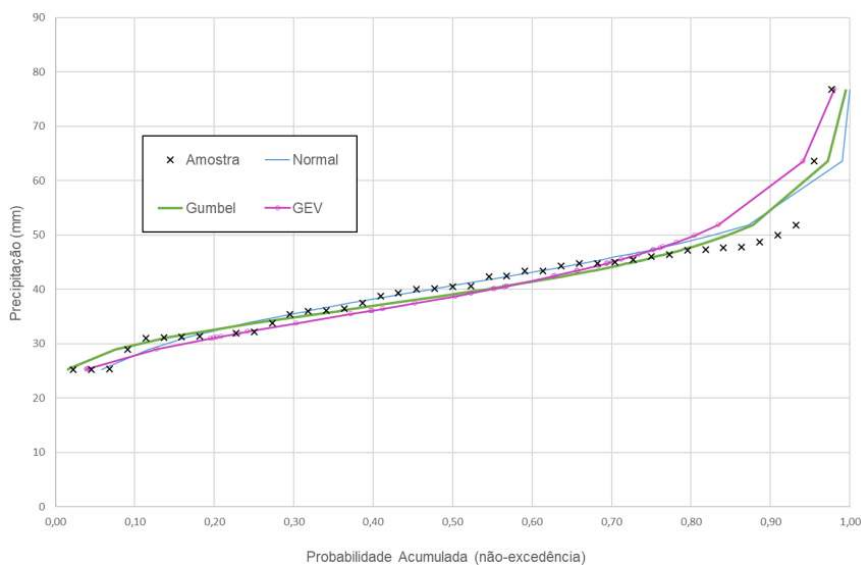
Consoante a Equação 9, para uma amostra de 43 anos dados, o valor crítico estabelecido pelo teste de *Kolmogorov-Smirnov* para um nível de significância de 5% é de 0,2074. Assim, as distribuições foram consideradas adequadas para o ajuste da precipitação

diária máxima anual, uma vez que as diferenças máximas entre a distribuição de frequência empírica e a teórica obtidas (0,0977 para Normal, 0,0925 para Gumbel e 0,1046 para GEV) foram inferiores ao valor crítico estabelecido pelo teste de *Kolmogorov-Smirnov* para um nível de significância de 5%.

O Gráfico 2 apresenta os gráficos gerados pelas distribuições empíricas e teóricas. Observa-se que a função de GEV apresenta um desempenho superior na representação dos eventos extremos que a função de Gumbel e Normal. A função de GEV se destaca na captura do comportamento das caudas da distribuição, o que é essencial para modelagem dos eventos de chuvas extremas. É importante ressaltar que a análise das precipitações máximas diárias anuais, baseada nos dados de satélite do CHIRPS, revelou um comportamento semelhante ao encontrado por Silva (2022), que destaca a importância da distribuição Generalizada de Valores Extremos (GEV) para modelagem de eventos extremos de precipitação.

Assim, para representar dados de chuvas intensas, a distribuição GEV é frequentemente a escolha preferida devido à sua capacidade de modelar eventos extremos de maneira mais eficaz (Silva, 2022). Por isso, este trabalho adotou a distribuição de GEV para a construção da equação de chuvas intensas para a bacia do rio Verde Grande. Com base nas precipitações geradas pela distribuição de GEV, a Tabela 1 resume as intensidades de chuva para diferentes tempos de retorno após a desagregação da chuva.

Gráfico 2 – Distribuições dos modelos probabilísticos utilizados



Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

Tabela 1 – Intensidade pluviométrica pela distribuição GEV, em mm.h-1

Duração (min)	Tempo de retorno (anos)								
	2	5	10	15	20	25	50	75	100
5	55,8	69,5	77,9	82,4	85,5	87,8	94,7	98,6	101,2
10	44,3	55,2	61,9	65,4	67,9	69,7	75,2	78,3	80,4
15	38,3	47,7	53,5	56,6	48,7	60,3	65,0	67,6	69,4
20	33,2	41,4	46,4	49,1	50,9	52,3	56,4	58,7	60,3
25	29,8	37,2	41,7	44,1	45,8	47,0	50,7	52,8	54,2
30	27,3	34,1	38,2	40,4	41,9	43,0	46,4	48,3	49,6
60	18,5	23,0	25,8	27,3	28,3	29,1	31,4	32,6	33,5
360	5,3	6,6	7,4	7,8	8,1	8,3	9,0	9,3	9,6
480	4,3	5,3	6,0	6,3	6,6	6,8	7,3	7,6	7,8
720	3,1	3,9	4,4	4,6	4,8	4,9	5,3	5,5	5,7
1440	1,8	2,3	2,6	2,7	2,8	2,9	3,1	3,2	3,3

Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

Na Equação 11, encontra-se a equação de chuva intensa para a Bacia do Verde Grande (Tabela 1). Os resultados da equação IDF demonstram boa concordância com os dados observados, como indicado pelo coeficiente de determinação (R^2) elevado de 0,999. Em relação à precisão do modelo IDF na representação dos dados observados, observa-se um erro médio absoluto de 0,89 mm.h⁻¹ e um erro máximo de 5,83 mm.h⁻¹.

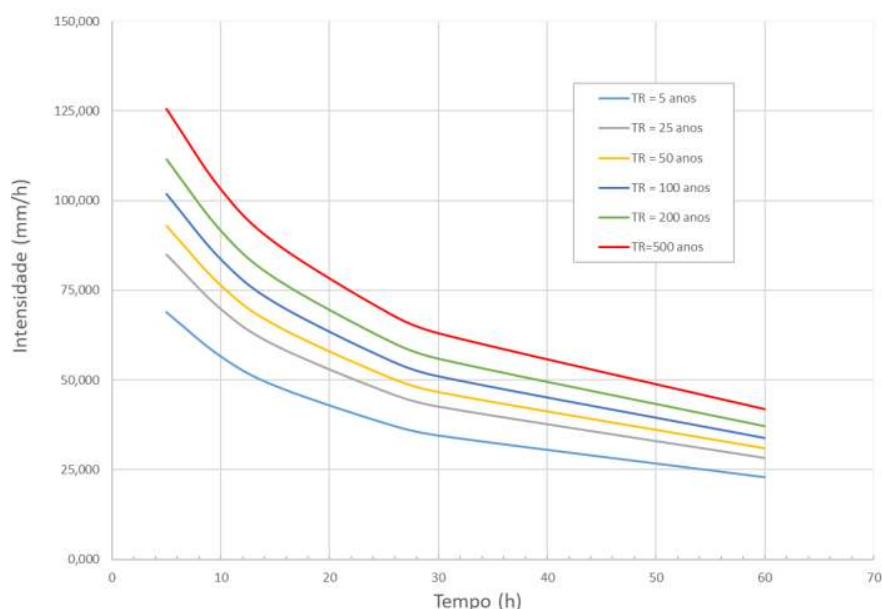
$$i = \frac{475,996 \cdot TR^{0,131}}{(11,870 + t_d)^{0,759}} \quad (11)$$

O Gráfico 3 ilustra as curvas IDF, resultantes da aplicação da Equação 11. Cada curva considera diferentes períodos de retorno, como 5, 10, 25, 50 e 100 anos. Essas curvas

representam a relação entre a intensidade da chuva (medida em mm/hora) e a duração da chuva, variando de 5 a 60 minutos.

É importante destacar que as curvas IDF são desenvolvidas com base em dados históricos, o que significa que elas representam padrões de chuvas do passado. No entanto, é fundamental reconhecer que o clima está passando por variações significativas devido às mudanças climáticas. Essas alterações podem afetar o comportamento das chuvas no futuro, tornando necessário considerar a necessidade de atualização periódica das curvas IDF para refletir essas mudanças.

Gráfico 3 – Curvas IDF geradas para a bacia do rio Verde Grande



Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

4.3 Relação entre os dados observados e o período histórico do GCM

Conforme indicado por Schardong *et al.* (2014), é importante verificar a correlação entre as precipitações máximas diárias anuais dos dados observados e dos dados da série histórica (1981- 2005) dos três modelos GCM (MIROC5, BESM e HadGEM). Para isso é necessário agrupar as maiores precipitações diárias por ano dos três modelos climáticos e aplicar a distribuição de GEV para cada grupo de dados. O valor do teste de aderência de KS

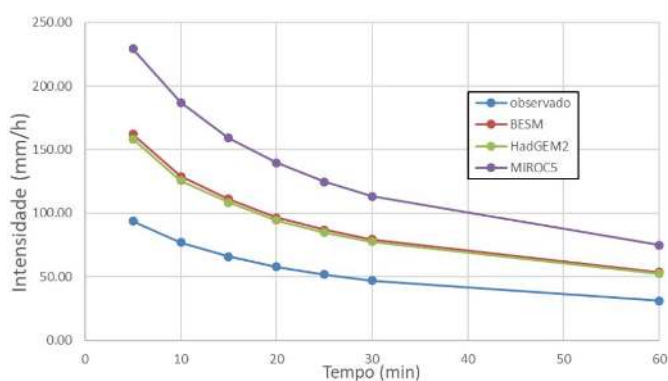
ao nível de significância de 5% demonstrou que os dados do período histórico se ajustaram adequadamente a distribuição de GEV (BESM = 0,08976; HadGEM = 0,09897; MIROC5 = 0,08596). O valor crítico para uma amostra de 25 dados é de 0,264 com base na Equação (9).

Ao aplicar o processo de geração da equação de chuva intensa, como apresentado na seção anterior, tem-se as curvas IDF, sintetizadas nos Gráficos 4 e 5, para os tempos de retorno de 50 e 100 anos, respectivamente. Analisando as curvas IDF geradas, os modelos revelaram uma discrepância frente aos dados observados. A discrepância entre os modelos e os dados observados pode ser atribuída a diversos fatores.

Tal divergência pode ser atribuída à resolução dos modelos climáticos globais, que, como observado por Schardong *et al.* (2014), frequentemente não capturam particularidades locais sem a devida correção (*downscaling*). Assim, os dados gerados pelos modelos precisam de um ajuste melhor para gerar as IDF's futuras. A metodologia de *downscaling* estatístico empregada no presente estudo, baseada na correspondência de quantis equidistantes, ajustou os dados climáticos históricos e futuros de forma eficaz, o que aumentou a confiabilidade dos resultados, ainda que ressalte a complexidade inerente à modelagem climática regional.

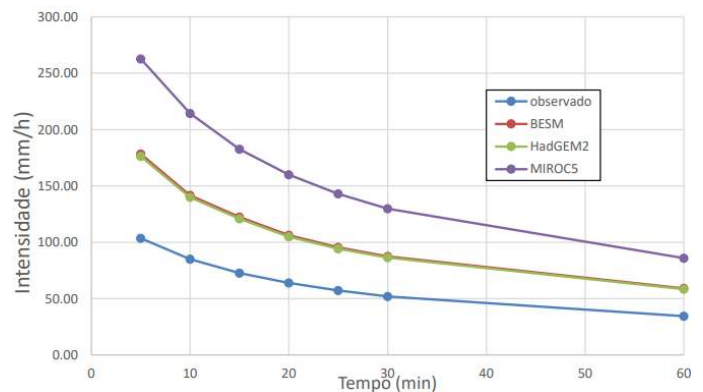
No entanto, os dados dos modelos possuem uma correlação de 0,99 com os dados observados, indicando que, apesar das discrepâncias mencionadas, os modelos estão bem ajustados para o período histórico. Isso sugere que os modelos conseguem representar adequadamente o comportamento climático passado da bacia do rio Verde Grande necessitando apenas de uma prévia correção, o que aumenta a confiabilidade das projeções futuras.

Gráfico 4 – Comparação entre curvas IDF para TR 50 anos



Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

Gráfico 5 – Comparação entre curvas IDF para TR 100 anos



Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

4.4 Relação entre o período histórico do GCM e o período futuro do GCM

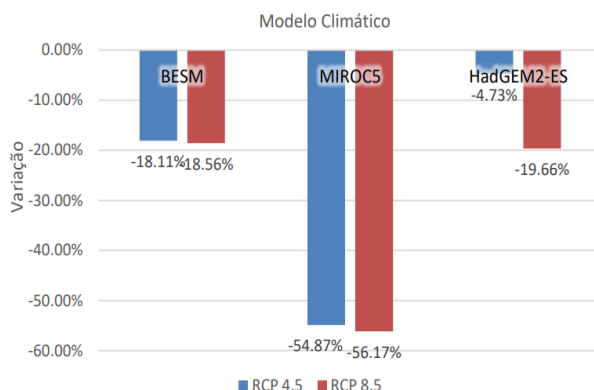
Antes de criar as equações IDF com projeções futuras, foi conduzida uma análise preliminar dos dados gerados pelo modelo, a fim de avaliar potenciais alterações no regime pluviométrico considerando as projeções até 2050 para a área de estudo. Comparando-se os valores gerados pelos modelos climáticos da série histórica (1981-2005) com os da série futura gerados pelos cenários RCP 4.5 (otimista) e RCP 8.5 (pessimista) observa-se no Gráfico 6, os resultados das variações médias das intensidades máximas.

Apesar de diferentes valores, todos os modelos apontam uma redução das precipitações diárias máximas. Tal fato acarretará impactos na construção das IDF já que refletirá em intensidades de chuva mais baixas para todos os períodos de retorno. Isso significa que eventos considerados extremos no passado podem não ser mais categorizados como tais no futuro, alterando a forma como os planejadores e engenheiros desenvolvem projetos para drenagem e infraestrutura hídrica.

Conforme o Gráfico 7, observa-se uma variação negativa da precipitação total anual média, apontando uma redução da precipitação total anual média tanto no cenário RCP 4.5 quanto no RCP 8.5 para todos os modelos climáticos estudados. Tal dado é alarmante, pois indica que as reduções de precipitação podem acarretar a consequente redução nas vazões de cursos de água da bacia do rio Verde Grande, bem como, possíveis impactos na recarga de reservatórios subterrâneos. Deste modo, as mudanças climáticas têm uma tendência de agravar a escassez de água para o abastecimento da população e das atividades econômicas. Isso pode intensificar os conflitos pelo uso da água, prejudicar a agricultura, pecuária e a geração de energia.

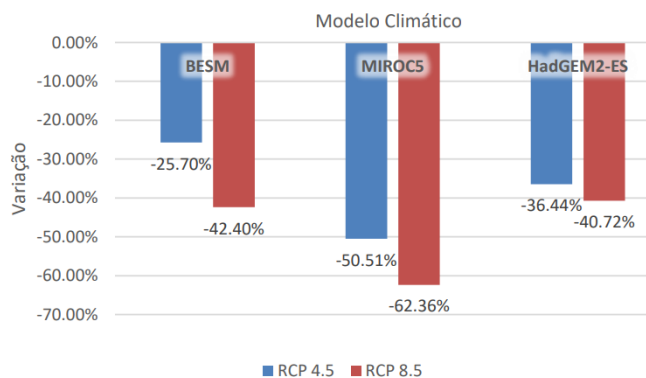
A projeção de uma redução nas precipitações dos totais anuais e das precipitações máximas para a bacia do rio Verde Grande segue a tendência identificada por Sá *et al.* (2018), que alerta para o agravamento da escassez hídrica na região. Segundo Sá *et al.* (2018), com base em dados de modelagem climática, a agricultura irrigada destaca-se como altamente vulnerável ao cenário de mudanças climáticas. Esse dado é especialmente preocupante, pois reflete o risco de comprometimento da principal atividade econômica da região, mesmo diante das intervenções propostas para mitigar a escassez hídrica.

Gráfico 6 – Variações da média das intensidades máximas



Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

Gráfico 7 – Variação da média dos totais anuais de chuva



Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

4.5 IDF com a projeção futura

Dado que o HadGEM2 foi escolhido para as análises das projeções futuras (2006-2050) nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5. O modelo climático HadGEM2 foi escolhido para este estudo devido à sua alta resolução espacial e temporal, o que o torna particularmente eficaz para projeções regionais detalhadas. Ao compará-lo com outros modelos de circulação global (GCMs), o HadGEM2 se destaca pela maior precisão na simulação das variáveis climáticas em regiões tropicais e semiáridas, como a bacia do rio Verde Grande. Vale ressaltar que o modelo apresenta as projeções mais otimistas dentre os cenários pessimistas apresentados neste trabalho.

Conforme a relação encontrada entre as chuvas observadas e as chuvas do período histórico do HadGEM2, ajustou-se os dados futuros gerados pelos modelos com base na metodologia de Schardong *et al.* (2014) e desenvolveu as curvas IDFs com projeções futuras. Os parâmetros das equações e seus respectivos coeficientes R^2 para os ajustes estão apresentados na Tabela 2, como resultado dos dados do modelo HadGEM 2 nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5.

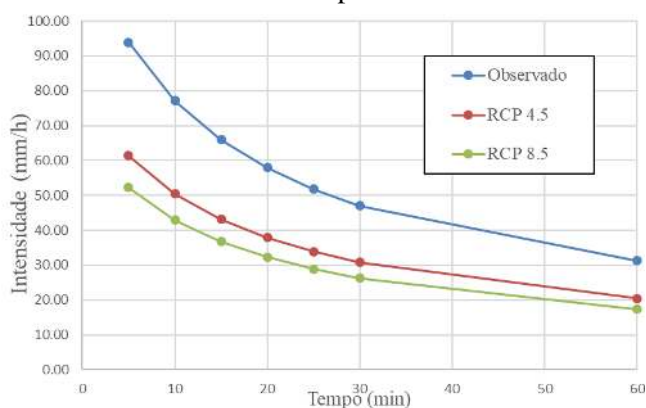
Tabela 2 – Parâmetros da equação de chuva intensa com projeções futuras

Cenários	Parâmetros				Variáveis analisadas no ajuste		
	a	b	c	d	R ²	Erro Médio	Erro Máximo
RCP 4.5	432,945	0,142	10,84	0,749	0,9999	0,5%	1,45
RCP 8.5	438,561	0,008	12,09	0,761	0,9982	0,6%	9,15

Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

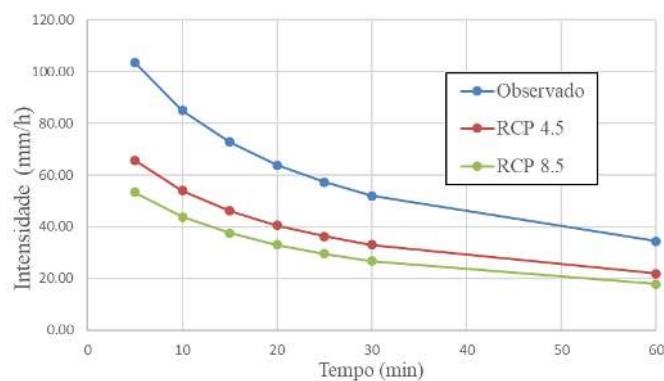
Os resultados provenientes das curvas IDF's do HadGEM2 referente ao período de retorno de 50 e 100 anos estão apresentados nos Gráficos 8 e 9, respectivamente. Vale ressaltar que as IDF's geradas para o RCP 4.5 e RCP 8.5 foram desenvolvidas com base na metodologia de Schardong *et. al* (2014). Verifica-se nos Gráficos 8 e 9 a discrepância entre as IDF's geradas a partir dos modelos futuros e os dados observados, indicando a necessidade de atualizações periódicas das curvas IDF (Calado *et al.*, 2020).

Gráfico 8 – Comparação entre as Curvas IDF's referente ao Tempo de Retorno de 50 anos



Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

Gráfico 9 – Comparação entre as Curvas IDF's referente ao Tempo de Retorno de 100 anos



Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

A Tabela 3 reúne as intensidades pluviométricas para diferentes durações. As análises que remetem ao período de retorno de 50 anos observaram no cenário RCP 4.5 uma redução média de 35% na intensidade média das chuvas máximas. O RCP 8.5 apresentou valores bem mais elevados cerca de uma redução média de 44%. Já para período de retorno de 100 anos, notou-se uma redução das intensidades média das chuvas máximas de 37% para o cenário RCP 4.5 e uma redução de 49% o cenário RCP 8.5.

Tabela 3 – Comparação entre as precipitações para TRs de 50 e 100 anos

Duração (min)	TR 50			TR 100		
	Observado	RCP 4.5	RCP 8.5	Observado	RCP 4.5	RCP 8.5
5	93,92	61,44	52,32	103,57	65,68	53,40
10	77,11	50,44	42,95	85,03	53,92	43,84
15	65,94	43,13	36,73	72,72	46,11	37,49
20	57,93	37,89	32,27	63,88	40,51	32,93
25	51,86	33,92	28,89	57,18	36,26	29,48
30	47,08	30,80	26,23	51,92	32,92	26,77
60	31,24	20,44	17,40	34,45	21,85	17,76
360	8,97	5,87	5,00	9,90	6,28	5,10
480	7,26	4,75	4,04	8,00	5,08	4,13
720	5,37	3,51	2,99	5,92	3,75	3,05
1440	3,19	2,09	1,78	3,52	2,23	1,81

Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

A redução das precipitações máximas pode ter sérias implicações para a gestão da bacia do rio Verde Grande, afetando a recarga dos aquíferos e comprometendo a disponibilidade de água subterrânea, essencial em períodos de seca. Trabalhos anteriores, como o de Sá *et al.* (2016), corroboram esse cenário, indicando que as mudanças climáticas simuladas pelos modelos climáticos e cenário de emissão de gases do efeito estufa impactam diretamente a sustentabilidade hídrica e aumenta a vulnerabilidade da bacia em estudo.

Por fim, vale ressaltar as limitações do estudo que incluem a resolução dos modelos climáticos utilizados, podendo não refletir adequadamente as particularidades locais da bacia do rio Verde Grande, gerando discrepâncias entre as previsões e os dados observados. A publicação do sexto relatório de avaliação do IPCC em 2021 introduziu modelos climáticos do CMIP 6, que incorporam novas classificações de emissões e poluentes atmosféricos, além de oferecer maiores resoluções espaciais, permitindo uma representação mais precisa do comportamento climático em escalas regionais e locais. Assim, recomenda-se o

desenvolvimento de estudos com os novos modelos climáticos e a realização de simulações fluviométricas para entender como as mudanças climáticas podem impactar os corpos hídricos.

5 CONCLUSÃO

Diante dos estudos realizados, destaca-se uma tendência de diminuição pluviométrica na bacia do rio Verde Grande para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, na relação Intensidade-Duração-Frequência (IDF). Essa redução das precipitações tem implicações significativas para a gestão da bacia, uma vez que compromete a recarga dos aquíferos e a disponibilidade de água, fatores cruciais para atender às demandas hídricas da população e das atividades econômicas locais, bem como o dimensionamento estruturas hidráulicas, visando a garantia da segurança hídrica. Portanto, recomenda-se a realização de estudos mais aprofundados para desenvolver ações adaptativas e mitigatórias, que respondam às consequências das mudanças climáticas e assegurem a sustentabilidade dos recursos hídricos na bacia do rio Verde Grande.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Verde Grande**. Brasília: ANA, 2013. 124 p. Disponível em: <https://cdn.agenciapeixevivo.org.br/media/2020/01/PRH-DA-BACIA-DO-RIO-VERDE-GRANDE.pdf>. Acesso: 24 out. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Verde Grande: Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Verde Grande**. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/gestao-das-aguas/planos-de-recursos-hidricos/planos-de-recursos-hidricos-de-bacias-hidrograficas/planos-de-bacias-hidrograficas-interfederativas/verde-grande#:~:text=Destaca%2Dse%20na%20bacia%20a,de%20diversos%20projetos%20de%20irriga%C3%A7%C3%A3o>. Acesso: 24 out. 2024.

ALBUQUERQUE, L. C. *et al.* Influência do uso e ocupação do solo sobre a vazão do alto da bacia do Rio Verde Grande - MG. **Caderno de Ciências Agrárias**, Belo Horizonte, v.10, n. 2, 15-22. 2018. Disponível em: <https://periodicos.ufmg.br/index.php/ccaufmg/article/view/3031>. Acesso em: 24 out. 2024.

BRITO, C. S. **Monitoramento da seca meteorológica usando dados de precipitação estimados de alta resolução espacial e de longo prazo**. 2020. 59 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2020. Disponível em: https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UFPB_32895d9632fcd4c9a61d780241c16415. Acesso: 24 out. 2024.

CALADO, G. M. C. *et al.* Utilização dos métodos expeditos para análise de chuvas intensas na cidade de Santa Cruz do Capibaribe-PE. *In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE*, 15., Caruaru, 2020. **Anais [...]**. Recife: ABRHhidro, 2020. p.1-10. Disponível em: <https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/130/XV-SRHNE0280-1-20200816-203047.pdf> Acesso: 24 out. 2024.

COMITÊ DE BACIA HIDROGRÁFICA DO VERDE GRANDE (CBH Verde Grande). **Apresentação**: Caracterização populacional. Disponível em: <https://verdegrande.cbh.gov.br/>. Acesso em: 29 ago. 2023.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA E SANEAMENTO AMBIENTAL (CETESB). **Drenagem urbana**: manual de projeto. 3. ed. São Paulo: Cetesb, 1986. 464 p.

FUNK, C. *et al.* **The climate hazards infrared precipitation with stations**: a new environmental record for monitoring extremes. DOI: 10.1038/sdata.2015.66. 2015. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/sdata201566>. Acesso em: 24 out. 2024.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2022**: impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK; New York, 2021. p. 167. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC_AR6_WGII_Full_Report.pdf. Acesso em: 24 out. 2024.

LANNA, A. E. Elementos de estatística e probabilidades. *In: TUCCI, C. E. M. (org.) Hidrologia*: ciência e aplicação. Porto Alegre: Ed. da UFRGS; ABRH, 2009. p.79 -176. (Série ABRH).

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. de A. **Hidrologia estatística**. Belo Horizonte: Serviço Geológico do Brasil, 2007. 600 p.

SÁ, M. C. de *et al.* Climate change and water resource sustainability index for a water-stressed basin in Brazil: the case study of Rio Verde Grande Basin. **Nativa**, Cuiabá, p. 480-485. 2018. DOI: <https://doi.org/10.31413/nativa.v6i5.5719>. Disponível em: <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/nativa/article/view/5719>. Acesso: 24 out. 2024.

SABÓIA, M. A. M. de. **Estratégia robusta para a gestão de drenagem urbana em cenário de mudança do clima**. 2016. 149 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/21176>. Acesso em: 24 out. 2024.

SCHARDONG, A.; SRIVASTAV, R. K.; SIMONOVIC, S. P. Equidistance quantile matching method for updating IDF curves under climate change. **Water Resources Management**, New York, v. 28, n.2, p. 2539-2562. 2014. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11269-014-0626-y>. Acesso em: 24 out. 2024.

SILVA, D. F. **Curvas IDF não-estacionárias na avaliação do efeito de mudanças climáticas em precipitações intensas**. 2022. 193 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/247573>. Acesso em: 24 out. 2024.

TAVARES, P. da S. *et al.* **Projeções climáticas para América do Sul regionalizadas pelo modelo Eta**. 2023. DOI: <https://doi.org/10.57810/lattesdata/WAVGSL>. Disponível em: https://repositorio.enap.gov.br/bitstream/1/8030/7/ModelagemClimticaeVulnerabilidadeSetoriaisMudanadoClimanoBrasil__compressed.pdf. Acesso em: 24 out. 2024.

TUCCI, C. E. M **Hidrologia**: ciência e aplicação. Editora UFRGS, Porto Alegre: ed. UFRG, 2009. 943p.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais - FAPEMIG e ao Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM) pelo apoio financeiro concedido, referente ao Processo APQ-01226-22, Edital No 003/2022 - Projeto Aprimoramento da Gestão de Recursos Hídricos no Estado de Minas Gerais, e também à Universidade Federal de Juiz de Fora pelo apoio financeiro concedido referente ao Edital de chamada de Projetos para o XXIV Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica e Tecnológica – PIBIC/FAPEMIG/UFJF – 2024 Edital 05/2023 – PROPP/Pesquisa.