

Tendências nas vazões futuras em bacia hidrográfica inserida no bioma Mata Atlântica na região serrana do Rio de Janeiro – Brasil

Trends in future streamflows in a watershed located in the
Atlantic Forest biome in the mountain region of Rio de
Janeiro – Brazil

Matheus Lima Gravino Passos¹ , Celso Bandeira de Melo Ribeiro¹ ,
Aline Sarmiento Procópio¹ , Marcel Pereira de Andrade¹ 

¹Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), Juiz de Fora, MG, Brasil. E-mails: matheuslgravino@gmail.com,
celso.bandeira@ufjf.br, aline.procopio@ufjf.br, marcel.pdandrade@gmail.com

Como citar: Passos, M. L. G., Ribeiro, C. B. M., Procópio, A. S., & Andrade, M. P. (2024). Tendências nas vazões futuras em bacia hidrográfica inserida no bioma Mata Atlântica na região serrana do Rio de Janeiro – Brasil. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, 21, e22. <https://doi.org/10.21168/rega.v21e22>

RESUMO: Estudos sobre segurança hídrica são essenciais diante das mudanças climáticas, que podem alterar significativamente a disponibilidade de água. Nesse sentido, os modelos hidrológicos desempenham um papel crucial na gestão de recursos hídricos ao possibilitar simulações que orientam decisões sobre a previsibilidade e o gerenciamento de bacias. Este estudo tem como objetivo contribuir para a gestão hídrica de Nova Friburgo – RJ, uma região montanhosa coberta pela Mata Atlântica, ao avaliar as tendências de vazão futura entre 2030 e 2060 (curto a médio prazo). Utilizando o modelo hidrológico SWAT e dados climáticos futuros de precipitação e temperatura do conjunto NEX-GDDP-CMIP6, foram projetados cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5. As estimativas climáticas, comparadas às normais climatológicas, sugerem um futuro mais seco e mais quente, com invernos ligeiramente mais úmidos. A análise de tendência com o teste de Mann-Kendall, para 95% de confiança, apontou que as vazões no período sazonal mais seco tendem a diminuir ao longo dos anos no cenário SSP2-4.5, caracterizando um cenário preocupante para segurança hídrica do município.

Palavras-chave: Modelo SWAT; Mudança climática; Análise de tendência.

ABSTRACT: Studies on water security are essential in the face of climate change, which can significantly alter water availability. In this context, hydrological models play a crucial role in water resource management by enabling simulations that guide decisions on predictability and basin management. This study aims to contribute to the water management of Nova Friburgo – RJ, a mountainous region covered by the Atlantic Forest, by assessing future flow trends between 2030 and 2060 (short to medium term). Using the SWAT hydrological model and future climatic data on precipitation and temperature from the NEX-GDDP-CMIP6 dataset, SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios were projected. Climate estimates, compared to climatological normals, suggest a drier and warmer future, with slightly wetter winters. The trend analysis using the Mann-Kendall test, with 95% confidence, indicated that streamflows during the driest seasonal period tend to decrease over the years in the SSP2-4.5 scenario, characterizing a concerning situation for the municipality's water security.

Keywords: SWAT model; Climate change; Trend analysis.

INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o crescimento populacional mundial aliado ao aquecimento global tem gerado um intenso debate sobre seus efeitos no clima, na sociedade e no meio ambiente, consequentemente, nos recursos hídricos. O Sexto Relatório do Intergovernmental Panel on Climate Change (2023), aponta como inequívoca a influência humana no aquecimento da atmosfera, dos oceanos e da terra, interferindo por sua vez, no equilíbrio de todo o sistema, com provável aumento de ocorrências para eventos extremos a partir da década de 1950. O aumento da frequência desses

Recebido: Novembro 20, 2024. Revisado: Dezembro 04, 2024. Aceito: Dezembro 17, 2024.



Este é um artigo publicado em acesso aberto (*Open Access*) sob a licença *Creative Commons Attribution*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

eventos expôs milhões de pessoas à insegurança alimentar, bem como reduziu a segurança hídrica. Esse cenário evidenciou a significativa dependência do segmento de recursos hídricos em relação aos fatores climáticos, tornando-o particularmente suscetível aos impactos das mudanças climáticas (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2017). Diante disso, torna-se crucial compreender os potenciais impactos decorrentes da vulnerabilidade da água à mudança climática, visando embasar estratégias eficazes para o gerenciamento dos recursos hídricos.

Para isso, o uso de ferramentas que auxiliem na compreensão dos efeitos dessas mudanças nos recursos hídricos se torna essencial, como, por exemplo, os modelos hidrológicos que se apresentam como ferramentas importantes (Fukunaga et al., 2015; Dill et al., 2022; Alvarenga et al., 2018). Em geral, esses modelos buscam gerar representações matemáticas simplificadas de um sistema complexo e propor resultados a partir de diferentes entradas (Tucci, 2005). Tais entradas podem ser desde dados observados em diferentes períodos de séries históricas, até mesmo dados estimados futuros. O Soil Water Assessment Tool (SWAT) (Arnold et al., 1998), por exemplo, destaca-se por ser um dos mais utilizados atualmente (Nguyen et al., 2022). Tem sido amplamente utilizado para estudos em bacias hidrográficas, permitindo avaliações a partir de diferentes perspectivas, como: disponibilidade hídrica (Oliveira et al., 2017); impactos ambientais do uso da terra e práticas de manejo (Siqueira et al., 2021; Andrade & Ribeiro, 2020); gestão frente as mudanças climáticas (Arfasa et al., 2024; Dill et al., 2022); impactos de fontes poluidoras (Zarrineh et al., 2020).

Por sua vez, para a compreensão das tendências climáticas e seus reflexos nos recursos hídricos, são essenciais os instrumentos que disponibilizem dados de estimativas futuras, possibilitando prognósticos. Nesse contexto, os modelos climáticos globais (GCM) assumem um papel fundamental (Gates, 1985; O'Neill, 2016; Zarrineh et al., 2020), fornecendo dados e projeções de variáveis climáticas, como a temperatura, precipitação, umidade relativa e outros mais, fundamentais para pesquisas que busquem compreender os reflexos das mudanças nos ecossistemas de forma ampla. Dito isto, conforme Amorim & Chaffe (2019), notou-se um aumento nos estudos que integram modelos climáticos na modelagem hidrológica, nas últimas duas décadas em todo o mundo.

Nesse tocante, torna-se evidente que o monitoramento da disponibilidade hídrica de bacias através de modelos hidrológicos é muito importante para se alcançar uma gestão mais robusta dos recursos hídricos disponíveis hoje e, possivelmente, no futuro. Portanto, o presente estudo teve como objetivo avaliar tendências nas séries de vazões estimadas para o futuro, em cenários de mudanças climáticas, visando a segurança hídrica de toda a bacia hidrográfica em que está localizada a principal Estação de Tratamento de Água (ETA) da região, como suporte à gestão de recursos hídricos na cidade de Nova Friburgo - RJ. Buscou-se com um modelo hidrológico e dados climáticos estimados para o período entre 2030 e 2060, avaliar os resultados obtidos para possíveis tendências no comportamento das vazões dessa bacia.

MATERIAL E MÉTODOS

Área do estudo

O estudo ocorreu em Nova Friburgo, município localizado na região serrana do Rio de Janeiro, com predomínio de Mata Atlântica. Com uma população de 189.937 habitantes e uma área de 935,429 km² (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2022), a cidade possui um clima serrano, caracterizando-se por temperaturas médias da normal climatológica de 1961 até 1990, que variam entre 14,1°C (julho) e 21,2°C (janeiro), com uma precipitação média de 232,1 mm em dezembro (máxima observada) e 23,7 mm em julho (mínima observada) (Instituto Nacional de Meteorologia, 2023).

A seleção da bacia para o estudo em questão foi orientada pela identificação da estação de tratamento de água (ETA) de maior relevância para o município. A intenção foi estabelecer um ponto de partida para uma avaliação significativa voltada a segurança hídrica na região, onde a foz da bacia modelada seja também o ponto de captação da ETA. Conforme a companhia de abastecimento de água potável da cidade (Grupo Águas do Brasil, 2024), a ETA Rio Grande de Cima é a principal, em função da sua capacidade de tratamento de 280 L/s, atendendo 77.042 habitantes, cerca de 40% da comunidade. Portanto, a área de drenagem de interesse, correspondente ao segmento do Rio Grande a jusante da ETA, em que o talvegue principal equivale a cerca de 31,258 km, é de aproximadamente 236 km².

A bacia modelada é uma parte integrante da bacia do Rio Paraíba do Sul, umas das mais significativas do Brasil. Além de ser considerada essencial para a cidade, também tem grande importância para o Rio Grande, que, se estendendo por cerca de 200 km, tem seu berço nessa região de interesse (Figura 1). Apesar de abrigar as principais nascentes do Rio Grande e situar-se no bioma

Mata Atlântica, a região enfrenta desafios de preservação devido à intensa atividade agrícola (Grupo Águas do Brasil, 2024), o que reforça a necessidade de investigação acerca da disponibilidade hídrica.

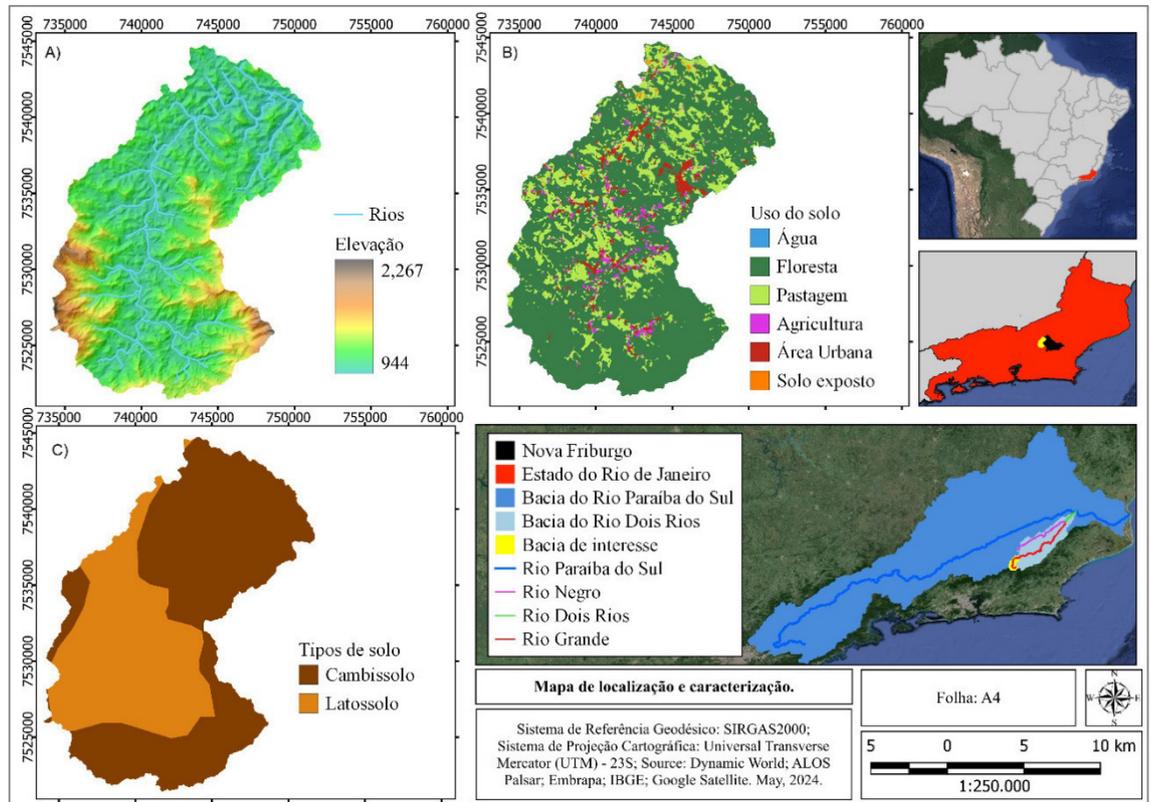


Figura 1. Localização e caracterização da bacia de interesse. Legenda: Mapa A) apresenta a elevação e a rede de drenagem; Mapa B) apresenta os principais usos e ocupação do solo; Mapa C) apresenta a caracterização edáfica da bacia. Fonte: O autor.

Modelo hidrológico *Soil and Water Assessments Tools* (SWAT)

O Soil and Water Assessment Tool – SWAT é um modelo matemático desenvolvido pelo Agricultural Research Service e pela Texas A&M University em 1996, sendo um modelo semi-distribuído e contínuo no tempo (Arnold et al., 2012). A sua configuração pode ser feita por código ou por aplicativos como o QSWAT+, um plugin do QGIS, que inclui o SWATPlusEditor para facilitar o tratamento e visualização das informações, além de realizar outras etapas. O modelo pode ser executado utilizando dados de diferentes escalas de tempo, como horário, diário, mensal. Neste estudo implementou-se no modelo o passo diário, sendo utilizada a interface do QSWAT+.

Critérios para a análise de sensibilidade, calibração e validação

As ferramentas disponíveis para a análise de sensibilidade, calibração e validação, são principalmente comerciais, todavia, o R-SWAT, adotado no presente estudo, é um software de código aberto recomendado por sua eficácia (Nguyen et al., 2022).

A calibração é crucial para garantir a precisão das simulações hidrológicas, sendo, no entanto, um processo desafiador devido à não unicidade dos modelos (Abbaspour et al., 2019) e à escassez de dados históricos de vazão. No Brasil, a validação é menos abordada frente a calibração, indicando dificuldades nesse processo (Bressiani et al., 2015). Optou-se pela calibração automática neste estudo, que utiliza técnicas computacionais para ajustar os parâmetros do modelo (Brighenti et al., 2016).

Antecedendo a calibração, a análise de sensibilidade é uma prática importante também adotada neste estudo, cujo papel é de indicar os parâmetros mais sensíveis para o modelo. Nesse sentido, a escolha preliminar dos parâmetros, seguida da análise de sensibilidade dentro do R-SWAT para seleção dos mais relevantes, apontou 11 parâmetros mais adequados. Os parâmetros utilizados no modelo hidrológico incluem: CN2 (Curva Número inicial para condição de umidade do solo II), SOL_AWC (Armazenamento de água no solo), ESCO (Coeficiente de compensação de evaporação de água no solo),

K.SOL (Condutividade hidráulica saturada), CANMX (Capacidade máxima de armazenamento das copas), SURLAG (Coeficiente de retardamento do escoamento superficial direto), EPCO (Fator de compensação de absorção pela vegetação), LATTIME (Escoamento lateral), ADJ_PKR (Fator de ajuste do coeficiente de escoamento superficial), PERCO (Taxa de percolação profunda no solo) e LAT_LEN (Distância média percorrida pela água enquanto flui lateralmente). A partir disso, a calibração foi realizada utilizando um número de 2.000 iterações, garantindo a convergência para os valores ótimos.

A comparação entre os dados simulados e os dados observados em séries históricas de estações fluviométricas é necessária para avaliar a qualidade do ajuste do modelo hidrológico, tanto na etapa calibração quanto na validação. Utilizando critérios estatísticos para quantificar essa concordância, como as funções objetivo, é possível confrontar as simulações do modelo hidrológico com os dados reais. O Coeficiente de Determinação (R^2), o Índice de Tendência Percentual (PBIAS), o Índice de Nash-Sutcliffe (NSE) e o Índice de Kling-Gupta (KGE) são métricas comuns usadas para esse fim. Neste estudo, optou-se por usar o NSE, KGE e o R^2 para avaliar a adequação das simulações, conforme indicado por Moriasi et al. (2007) e Mai et al. (2022) (Tabela 1).

Semelhante a Brighenti et al. (2016) e Klemeš (1986), a série de dados foi dividida em dois períodos, de forma que 70% dos dados iniciais foram destinados a calibração do modelo e os 30% restantes para a validação, depois, os períodos são alterados, de forma que 30% dos iniciais são destinados a validação e o restante para calibração.

Tabela 1. Resultados para a função objetivo NSE, KGE e R^2 a serem considerados.

Critério	Classificação	Faixa de variação do índice
NSE	Muito bom	$0,75 < NSE \leq 1,00$
	Bom	$0,65 < NSE \leq 0,75$
	Satisfatório	$0,5 < NSE \leq 0,65$
	Insatisfatório	$NSE \leq 0,5$
KGE	Excelente performance	$KGE \geq 0,83$
	Boa performance	$0,65 \leq KGE < 0,83$
	Média performance	$0,48 \leq KGE < 0,65$
	Pobre performance	$0,48 < KGE$
R^2	Relação linear perfeita	$R^2 = 1$
	Aceitável	$R^2 > 0,5$
	Não existe relação linear	$R^2 \leq 0,5$

Fonte: Adaptado de Moriasi et al., (2007) e Mai et al. (2022).

Dados de entrada para a caracterização física da bacia

O modelo SWAT requer dados de entrada essenciais para caracterizar fisicamente a bacia, como declividade (obtido com o modelo digital de elevação), tipos de solo e uso da terra para parametrização da bacia e geração das unidades de resposta hidrológica (HRU), denominação para as áreas homogêneas em termos de suas características hidrológicas. Os dados utilizados são apresentados em maiores detalhes na Tabela 2.

Tabela 2. Conjunto de dados utilizados na fase inicial de implementação do modelo SWAT.

Tipo de dado	Fonte	Formato	Resolução
Modelo Digital de Elevação (DEM)	ALOS PALSAR	Raster	12,5 metros
	(National Aeronautics and Space Administration, 2023)		
Uso e Cobertura do Solo	Dynamic World (Brown et al., 2022)	Raster	10 metros
Solos	EMBRAPA (Santos et al., 2011)	Shapefile	1:5.000.000

Fonte: O autor.

Dados de entrada hidrometeorológicos

Neste estudo, os dados diários de precipitação, umidade relativa do ar, temperatura máxima e mínima foram obtidos primeiramente por meio de estações pluviométricas e meteorológicas, tendo seus dados disponíveis nos portais: Hidroweb da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2023) e do Instituto Nacional de Meteorologia (2024), respectivamente. Os dados meteorológicos de umidade relativa do ar (%), temperatura máxima e mínima (°C) foram obtidos exclusivamente da estação Cordeiro (Cód. 83718), localizada próxima da bacia e com a série histórica mais adequada para o escopo do trabalho.

Quanto aos dados pluviométricos (mm), além das precipitações obtidas a partir de duas estações locais; consideradas adequadas (São Lourenço [Cód. 2242009] e Fazenda Mendes [Cód. 2242022]); adotou-se uma abordagem alternativa para representar essa variável na bacia, empregando dados de reanálise do Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations (CHIRPS) (Funk et al., 2015), obtidos via Google Earth Engine (GEE), para cada uma das sub-bacias, obtendo-se o valor médio para cada. Os dados da ANA e do CHIRPS foram tomados para o mesmo período com o objetivo de assegurar a sobreposição temporal necessária para a caracterização precisa do regime de precipitação na bacia. Essa consistência temporal foi essencial para integrar as diferentes fontes de dados no processo.

Ademais, a calibração do modelo necessita de séries de dados fluviométricos históricos e, portanto, utilizou-se dados da estação fluviométrica Ponte estrada Dona Mariana (Cód. 58825000) (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2023) próxima ao ponto de captação da ETA Rio Grande de Cima. Destaca-se que a escolha do período para obtenção de todos os parâmetros mencionados, foi motivada pela eventual disponibilidade e qualidade das informações adquiridas da estação fluviométrica.

O conjunto de dados hidrometeorológicos é apresentado na Tabela 3.

Tabela 3. Conjunto de dados hidrometeorológicos utilizados na fase inicial de implementação do modelo SWAT.

Tipo de dado	Fonte	Intervalo	Período
Precipitação	Hidroweb	Diário	01/01/1995 – 01/01/2006
	(Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2023)		
Precipitação	CHIRPS	Diário	01/01/1995 – 01/01/2006
	(Funk et al., 2015)		
Temperatura máxima, mínima	Banco de Dados Meteorológicos	Diário	01/01/1995 – 01/01/2006
	(Instituto Nacional de Meteorologia, 2024)		
Umidade relativa do ar	Banco de Dados Meteorológicos	Diário	01/01/1995 – 01/01/2006
	(Instituto Nacional de Meteorologia, 2024)		
Fluviométrico	Hidroweb	Diário	01/01/1995 – 01/01/2006
	(Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2023)		

Fonte: O autor.

Em suma, a bacia de interesse teve seu regime de vazões modelado, tendo como insumos os itens supracitados. Considerado suficiente para calibração e validação, adotou-se o período de 1 de janeiro de 1995 até 1 de janeiro de 2006, sendo utilizado três anos iniciais de aquecimento para otimização dos parâmetros. A Figura 2 ilustra de modo geral os passos de implementação do processo.

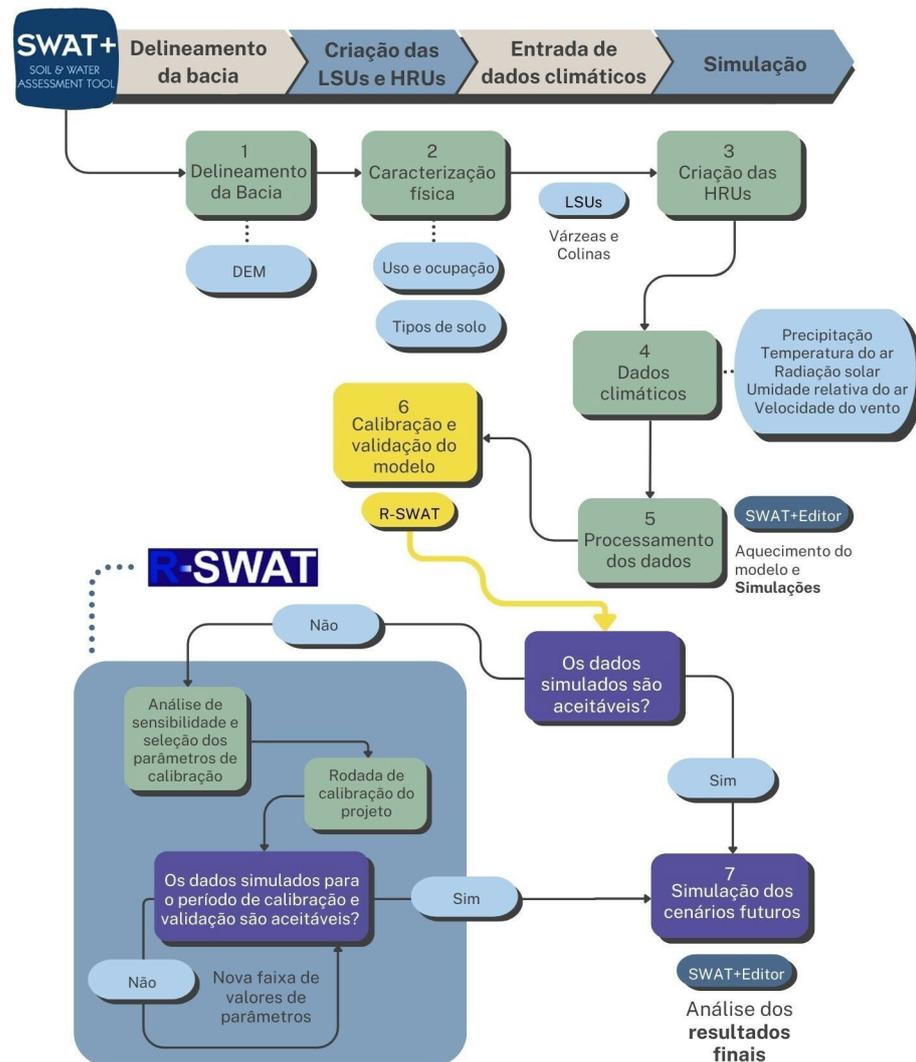


Figura 2. Delineamento geral do processo de implementação do modelo SWAT e R-SWAT. Legenda: DEM - Modelo Digital de Elevação; LSUs - Unidades de paisagem. Fonte: O autor.

Cenário futuro adotado

Após o estabelecimento do modelo para a bacia, os dados futuros foram obtidos do conjunto de dados NEX-GDDP-CMIP6 disponibilizado pela NASA por intermédio da ferramenta Google Earth Engine (GEE) (Thrasher et al., 2021). Essa é uma base gratuita que compila diversos cenários globais baseados nos Caminhos Socioeconômicos Compartilhados (SSP) do CMIP6, com ajustes de vieses e alta resolução. As projeções disponibilizadas pelo conjunto de dados abrangem dados de 35 modelos CMIP6 e quatro cenários SSP, cobrindo o período de 1950 a 2100, com uma resolução espacial refinada de 0,25 graus x 0,25 graus. Maiores detalhes podem ser verificados na nota técnica NEX-GDDP-CMIP6 do NASA Center for Climate Simulation (Thrasher et al., 2022).

Nesta etapa do estudo foram conferidos dados de dez modelos climáticos globais: CMCC-ESM2; MPI-ESM1-2-HR; BCC-CSM2-MR; ACCESS-CM2; GFDL-ESM4; GISS-E2-1-G; IPSL-CM6A-LR; MIROC6; TaiESM1; NESM3. Quanto aos cenários, foram selecionados os que apresentam um desenvolvimento de tendência, mais associado aos padrões históricos (SSP2-4.5) e outro que propõe um desenvolvimento mais pessimista, com o desenvolvimento social fortemente associado à utilização de combustíveis fósseis (SSP5-8.5) (O'Neill et al., 2016; Siqueira et al., 2021).

As variáveis climáticas utilizadas foram os dados de precipitação e temperaturas máximas e mínimas, extraídos ao passo diário, contemplando um horizonte de curto a médio prazo, estabelecido dentro do período de 01/01/2030 até 31/12/2060 (30 anos). Em função do contraste em termos de resolução espacial (dimensão do pixel), entre a resolução dos dados projetados e a escala da bacia modelada, a caracterização climática foi realizada para um único ponto central, adotando-se, portanto, o centroide da bacia.

Análise de tendência nas vazões estimadas para o futuro

A análise estatística das vazões projetadas foi conduzida visando averiguar a existência de tendências sazonais que possam contribuir na gestão da bacia. Os testes estatísticos executados foram todos realizados utilizando o software ProUCL (United States Environmental Protection Agency, 2022). Além disso, eles foram aplicados às séries temporais de vazões, obtidas a partir da mediana das estimativas dos modelos climáticos utilizados, para cada um dos cenários: SSP2-4.5 e SSP5-8.5, resultando em quatro grupos de medianas (amostras) a serem analisadas (Figura 3). As medianas foram determinadas para fornecer uma medida central das vazões projetadas, minimizando a influência de outliers nas estimativas de tendência.

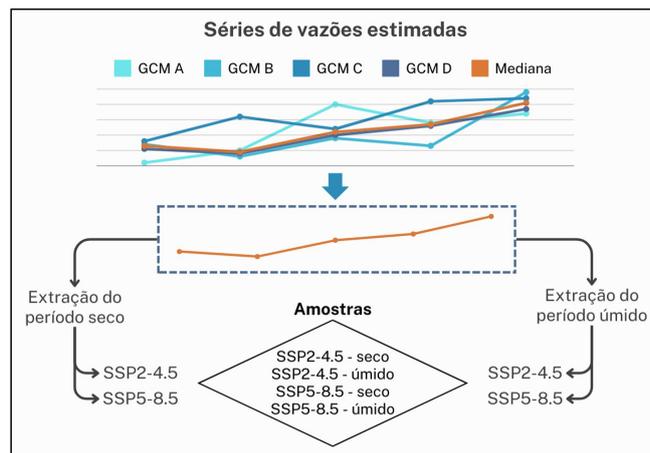


Figura 3. Organização dos dados das séries temporais de vazões estimadas para aplicação dos testes. Os modelos citados na figura são apenas representações simbólicas. Fonte: O autor.

Primeiramente, foi aplicado o teste de normalidade de Shapiro-Wilk (Shapiro et al., 1968; Royston, 1982) para avaliar se os dados seguiam uma distribuição normal. A hipótese nula (H_0) deste teste, consiste que os dados seguem uma distribuição normal, enquanto na hipótese alternativa (H_1), que os dados não seguem uma distribuição normal. Com base no valor de p obtido pelo teste de normalidade, de maneira que: para $p < 0,05$ rejeitamos H_0 e aceitamos H_1 ; foram escolhidos os testes estatísticos subsequente.

Para investigar tendências sazonais nas vazões, a série de dados das medianas foi dividida em dois períodos: seco (abril – setembro) e úmido (outubro – março). O teste de Wilcoxon-Mann-Whitney (Crawford et al., 1983; Hollander et al., 2013; Depuy et al., 2014) foi aplicado para comparar e verificar se esses dois conjuntos de dados representavam de fato amostras com características distintas. A hipótese nula (H_0) deste teste indica que as amostras podem ser iguais, enquanto na hipótese alternativa (H_1) que há diferença entre elas, com um grupo apresentando valores maiores que o outro e, portanto, amostras diferentes. Foi adotado $p < 0,05$ para rejeitar H_0 .

Por fim, o teste de Mann-Kendall (Hipel & McLeod, 1994; Libiseller & Grimvall, 2002), amplamente utilizado na detecção de tendência em dados hidrológicos (Hamed, 2008), foi aplicado em ambos os períodos para detectar a presença de tendências sazonais nas séries das medianas. A hipótese nula (H_0) deste teste é que não há tendência (os dados são independentes e distribuídos aleatoriamente), enquanto a hipótese alternativa (H_1) indica que existe uma tendência monotônica (crescente ou decrescente) na série temporal. Foi adotado $p < 0,05$ para rejeitar H_0 . No caso de existência de tendência o seu tipo foi determinado pelo coeficiente angular, chamado por OLS Regression Slope (m).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização física da bacia hidrográfica e suas unidades de resposta hidrológica

A bacia hidrográfica estudada foi dividida em 22 sub-bacias e 91 trechos de canais, abrangendo uma área total de aproximadamente 23.639 hectares (236,39 km²). Esta área está dividida principalmente em duas unidades: a planície de inundação, representando 15,62% da área total (36,92 km²), e a parte de colinas, representando 84,38% (199,47 km²). A elevação varia de 944 a 2.267 metros. Quanto ao uso da terra,

predominam as florestas de Mata Atlântica (73,26%, ou 173,26 km²), seguidas por pastagens (20,37%, ou 48,09 km²), áreas urbanas (2,55%, ou 6,03 km²) e outras áreas (3,82%, ou 9,03 km²). Os solos mais comuns são o cambissolo (60,25%, ou 142,43 km²) e o latossolo (39,75%, ou 93,96 km²). Em termos de inclinação, variando em faixas entre 0 a 100%, a maior parte da bacia (33,26%, ou 78,92 km²) apresenta inclinação na faixa de 40-60%. No entanto, a faixa de 20-60%, que abrange 64,93% da bacia (153,52 km²), caracteriza o relevo da bacia como ondulado e montanhoso, de acordo com a classificação de Ramalho Filho & Beek (1995).

As unidades de resposta hidrológica foram geradas em conformidade com a caracterização física da bacia hidrográfica. Em suma, compreende-se que a unidade de resposta hidrológica mais representativa seja constituída por florestas de Mata Atlântica, sobre solo cambissolo, junto de um relevo ondulado e montanhoso, totalizando aproximadamente 0,087 km². Em contrapartida, a menos observada, com apenas 0,0008 km², é composta pela combinação de solo descoberto, tipo de solo cambissolo e relevo ondulado.

Análise de sensibilidade, calibração e validação do modelo

Com base na análise de sensibilidade e no ajuste realizado a partir de 2.000 iterações, foram obtidos os valores ótimos para os parâmetros selecionados. A calibração e validação do modelo foram avaliadas utilizando as funções objetivo NSE, KGE e R². Os valores alcançados para cada função objetivo selecionada, bem como para cada um dos parâmetros dentro da sua respectiva faixa de variação, seguem descritos nas Tabelas 4 e 5.

Tabela 4. Melhores resultados obtidos para cada função objetivo.

Período	Tipo	NSE	KGE	R ²
01/1998 - 07/2003	Calibração	0,504	0,701	0,505
08/2003 - 01/2006	Validação	0,339	0,408	0,436
06/2000 - 01/2006	Calibração	0,422	0,538	0,471
01/1998 - 05/2000	Validação	0,46	0,66	0,505

Fonte: O autor.

Tabela 5. Resultados alcançados para cada parâmetro dentro do software R-SWAT.

Parâmetros [unidades]	Descrição	Limite inferior	Limite superior	Melhor resultado
CN2 [adimensional]	Curva Número inicial para condição de umidade do solo II	-0,70	0,20	-0,230
SOL_AWC [mm_H2O/mm]	Armazenamento de água no solo	0,01	1	0,943
ESCO [adimensional]	Coefficiente de compensação de evaporação de água no solo	0	1	0,051
K.SOL [mm/hr]	Condutividade hidráulica saturada	300	1000	672,407
CANMX [mm/H2O]	Capacidade máxima de armazenamento das copas	1	100	63,549
SURLAG [days]	Coefficiente de retardamento do escoamento superficial direto	0,05	24	16,249
EPCO [adimensional]	Fator de compensação de absorção pela vegetação	0	1	0,129
LATTIME [days]	Escoamento lateral	2	11	3,853
ADJ_PKR [days]	Fator de ajuste do coeficiente de escoamento superficial (CN)	0,5	2	1,687
PERCO [fraction]	Taxa de percolação profunda no solo	0	1	0,988
LAT_LEN [m]	Distância média percorrida pela água enquanto flui lateralmente	0	50	11,469

Fonte: O autor.

Em resumo, o índice Kling-Gupta Efficiency (KGE) apresentou valores de 0,701 na calibração e 0,66 na validação, ambos classificados como bom desempenho, conforme os critérios de Mai et al. (2022), que definem valores entre 0,65 e 0,83 como bons. Durante a calibração (01/1998 a 07/2003), o modelo mostrou ajuste satisfatório com Índice de Nash-Sutcliffe (NSE) entre 0,5 e 0,65, KGE entre 0,65 e 0,83, e o Coeficiente de Determinação (R^2) superior a 0,5. Já na validação (01/1998 a 05/2000), o desempenho permaneceu bom, com KGE entre 0,65 e 0,83 e R^2 maior que 0,5. Entre as métricas analisadas, o KGE apresentou os resultados mais promissores, destacando a eficácia do modelo. Contudo, alguns pontos de atenção foram identificados. Observou-se que as funções objetivo mostraram menores correspondências entre os dados históricos e as simulações nos períodos de maiores vazões. Esse desempenho insatisfatório pode ser atribuído à presença das maiores descargas, que influenciam diretamente os valores de NSE, dado que este indicador está relacionado com as vazões máximas (Passos et al., 2021). Além disso, conforme Tobin & Bennett (2009), é dito que o SWAT tem um problema documentado de subestimar eventos de vazões mais altas. No entanto, os resultados de NSE indicam que, embora aquém do ideal considerando Moriasi et al. (2007), valores abaixo de 0,5 podem ser considerados satisfatórios para simulações diárias (Christiansen et al., 2017), como também pode ser observado no estudo de Yilmaz & Onoz (2020), onde se considera satisfatório $0,3 \leq NSE < 0,5$. Considerando esses fatos, bem como os desafios relatados por diversos autores nessa etapa (Abbaspour et al., 2019; Bressiani et al., 2015; Brighenti et al., 2017), o modelo foi considerado calibrado e validado.

Análise da performance do modelo

Os resultados das simulações de vazões com o modelo SWAT foram analisados comparativamente aos dados históricos (Figura 4). Devido a amplitude da série considerada, foi possível observar alguns pontos de conformidades e divergências. Quanto a sazonalidade, julgou-se coerente as respostas do modelo, uma vez que houve similaridade entre o período simulado seco e chuvoso, com os ciclos característicos das vazões históricas. No entanto, os comportamentos de super e subestimativas nas vazões simuladas são outras características passíveis de serem notadas. De modo geral, os períodos secos são representados pelo modelo com vazões subestimadas e os períodos chuvosos com vazões superestimadas. Aproximadamente a partir da metade do ano 2001, as vazões simuladas possuíram melhores convergências com as vazões históricas, com exceção aos picos localizados próximos a fevereiro de 2005, enquanto no período antecedente a 2001 o modelo apresentou-se com mais divergências entre os dados simulados e históricos.

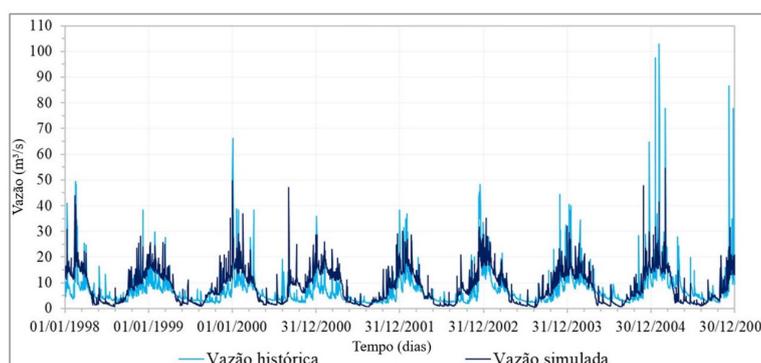


Figura 4. Hidrograma de vazões simuladas (m^3/s) com o modelo SWAT e vazões históricas (m^3/s) (Cód. 58825000) para o período de referência: 01/01/1998 – 01/01/2006. Fonte: O autor.

As curvas de permanência, que representam a relação entre as vazões e a frequência com que essas vazões são igualadas ou excedidas ao longo do tempo, também fornecem uma visão para a variabilidade e a disponibilidade das descargas líquidas ao longo de um período. Sendo assim, as curvas de permanência foram elaboradas para comparar as vazões históricas e os resultados obtidos com a simulação (Figura 5).

Tomando-se como extremos a Q5 e a Q95, sendo elas, respectivamente, a vazão que é excedida ou igualada 5% do tempo (vazões máximas) e a vazão que é excedida ou igualada 95% do tempo (vazões mínimas), a comparação das curvas permite compreender que, para o intervalo de vazões entre $4,3 m^3/s$ e $20,1 m^3/s$, o modelo gerou superestimativas, com o incremento máximo observado

na Q20, cerca de 47% acima do valor histórico (4,6 m³/s em termos absolutos). Por outro lado, vazões inferiores a 4,3 m³/s foram subestimadas com divergência de até 118% (para a Q95), o que em termos absolutos representou uma divergência menor comparado ao da Q20, sendo de apenas 1,3 m³/s. Portanto, o ajuste do modelo mostrou-se satisfatório apenas para as vazões de permanência entre cerca de 50% e 100%, não sendo adequado para o ramo superior da curva, onde ocorrem as maiores vazões simuladas como pode ser observado na Figura 5.

Ao analisar a performance do modelo, pôde-se considerar que ele apresentou um comportamento conservador, superestimando as vazões de pico, o que pode ser crucial para simulações de risco no tocante às obras hidráulicas por exemplo, e subestimando as vazões mais baixas, o que por sua vez é importante para tomadas de decisões em períodos de seca, favorecendo uma gestão mais segura para o abastecimento público.

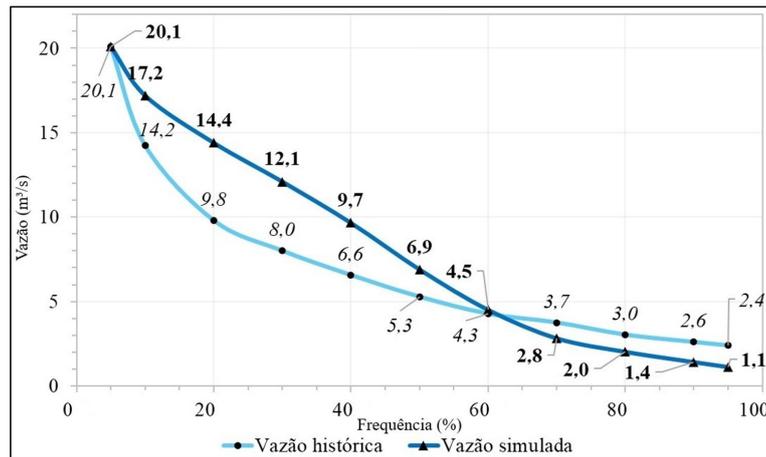


Figura 5. Curvas de permanência geradas para as vazões históricas (Cód. 58825000) e simuladas para o mesmo período (01/01/1998 - 01/01/2006). A curva azul escuro faz referência a vazão simulada (m³/s) e em azul claro a vazão histórica (m³/s) com cada respectivo marcador correspondendo a uma vazão de referência (ex.:Q10, Q90). Fonte: O autor.

Análise das estimativas futuras

Os dados futuros entre 2030 e 2060, que caracterizam os cenários adotados (SSP2-4.5 e SSP5-8.5) para os dez modelos considerados, são apresentados nas Figura 6 e 7, de forma comparativa com as normais climatológicas (1931 - 1960 e 1961 - 1990) de cada uma das variáveis, obtidas a partir da estação Cód. 83745 (Instituto Nacional de Meteorologia, 2024).

Verificou-se que as precipitações projetadas apresentaram maior variabilidade nos meses geralmente mais úmidos, de outubro a março, com desvios padrão (σ) entre 10,06 e 17,52 mm. Notou-se para o mesmo período, que, com exceção de outubro, as precipitações médias mensais obtidas a partir das estimativas dos modelos, em momento nenhum superaram ambas as normais climatológicas. Em outras palavras, a média das projeções no máximo iguala uma das normais, mas nunca as supera. Isso indica uma tendência de diminuição ou estabilização das precipitações nos meses mais chuvosos.

Por sua vez, no período mais seco (abril - setembro), setembro é o único mês em que a média calculada está abaixo das duas normais. Já nos meses de maio, julho e agosto, as estimativas indicam um aumento sutil das precipitações em comparação com os registros históricos. Em termos de variabilidade os desvios são menores, em torno de 9,5 mm para setembro e 4,16 mm para agosto.

Além disso, as maiores diferenças são notadas quando se utiliza a normal de 1931-1960 como referência, enquanto a normal mais recente é mais semelhante às estimativas dos modelos. Nesse sentido, observa-se a maior queda, cerca de 100 mm em dezembro.

Para as estimativas das temperaturas máximas e mínimas, observou-se uma grande divergência pelo modelo TaiESM1, cuja deficiência não pôde ser justificada. Portanto, esse modelo foi descartado para reduzir as incertezas associadas, uma vez que os demais modelos apresentaram um comportamento coerente e entre suas projeções.

Analisando os resultados a partir da média calculada entre as projeções, percebe-se que as temperaturas máximas mostraram uma projeção de aquecimento mais evidente no auge do inverno, entre junho e julho (cerca de 1 °C) em comparação com as duas normais. Para o cenário SSP5-8.5, a média indica um prolongamento do aquecimento nos meses seguintes, superando de forma sutil as normais entre novembro e dezembro. Já para as temperaturas mínimas, a média em ambos os cenários

indicou um aquecimento consistente ao longo do ano, sendo mais significativo nos meses mais frios, com aumentos superiores a 2°C em julho, tanto no cenário moderado quanto no mais extremo. Esse fato destaca a importância de medidas governamentais em reduzir as emissões de gases de efeito estufa e controlar o aquecimento global, pois temperaturas mais elevadas sinalizam um desequilíbrio térmico preocupante. Em termos de variabilidade, as temperaturas mínimas são estimadas com desvios menores ($\sigma \leq 0,4$ °C), diferente das máximas, cujo desvio chegou até cerca de 0,7 °C, tendo o mês de outubro as maiores incertezas.

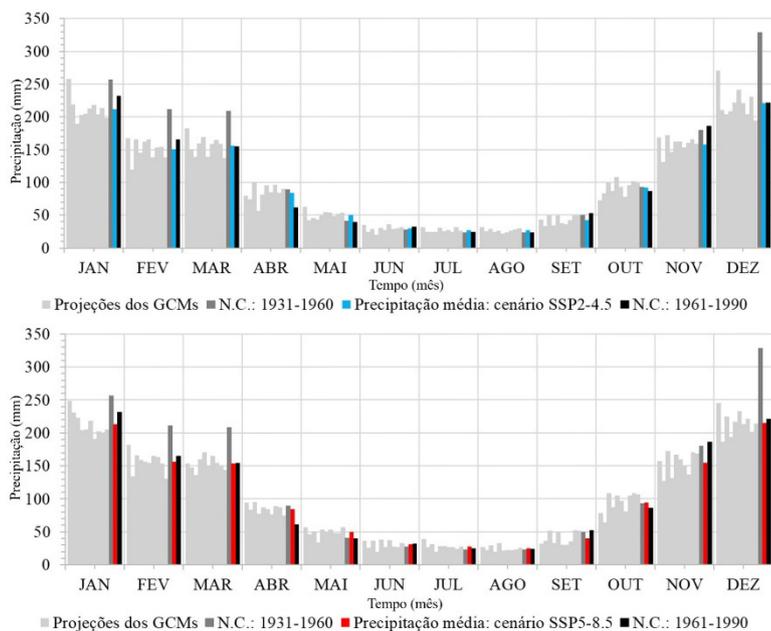


Figura 6. Comportamento da precipitação média acumulada (mm) por mês, para representar o período futuro em confronto com suas normais climatológicas. Fonte: O autor.

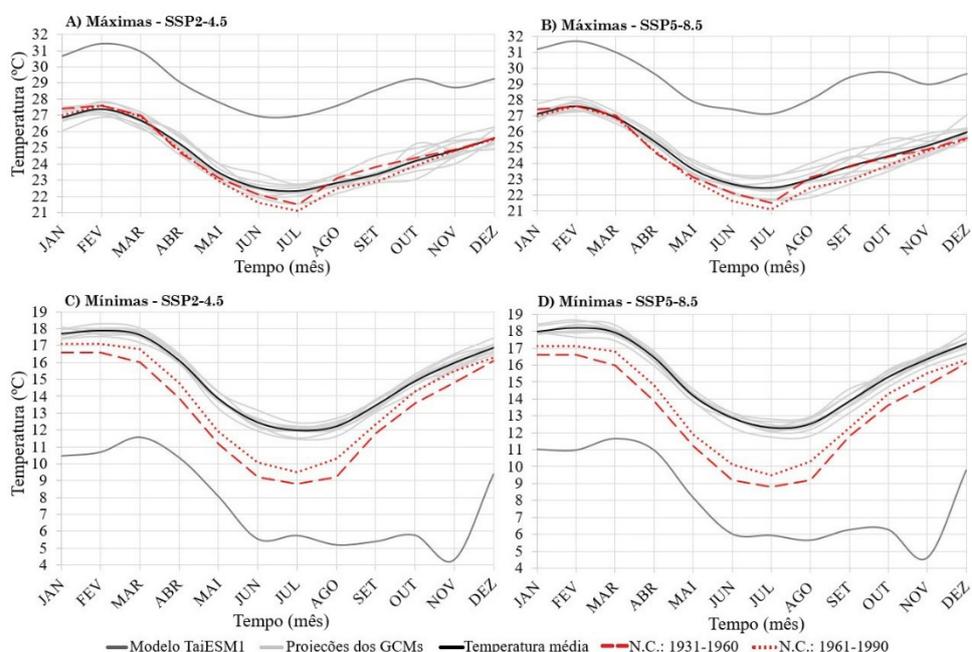


Figura 7. Comportamento das temperaturas médias mínimas (C e D) e máximas (A e B) (°C), por cenário, para representar o período futuro em confronto com suas normais climatológicas. Descartou-se o modelo TaiESM1. Fonte: O autor.

Sendo assim, com o input dos dados supracitados no modelo hidrológico, foi possível obter os prognósticos de vazões, analisadas no item seguinte, considerando as duas perspectivas para o futuro

(cenário intermediário e extremo). As séries de vazões projetadas por cada GCM estão apresentadas na Figura 8, destacando-se as medianas obtidas para cada cenário a partir dessas simulações multi-modelos.

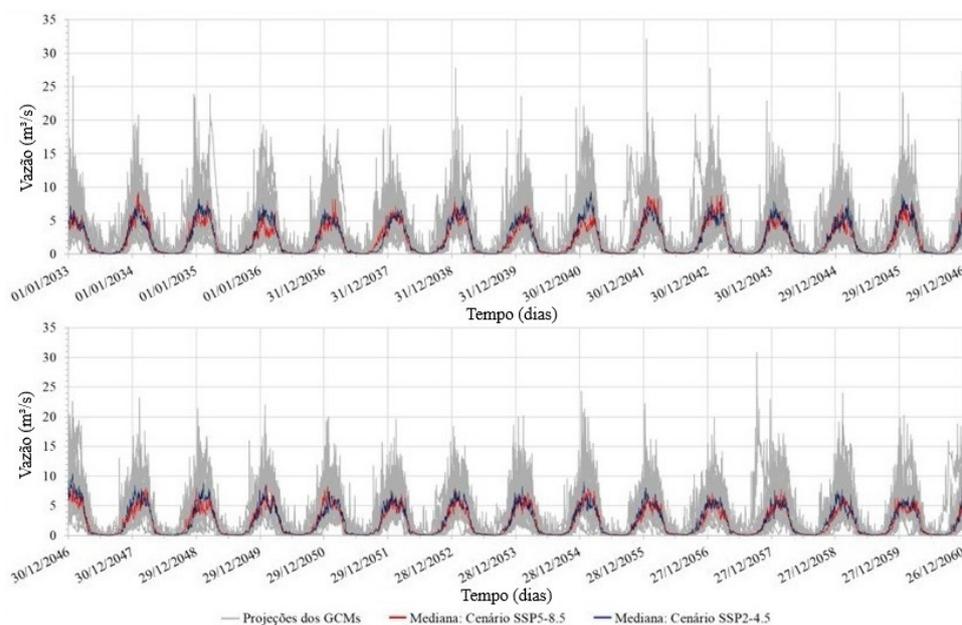


Figura 8. Séries de vazões (m^3/s) simuladas para o futuro da bacia, considerando os dois cenários e suas medianas. Fonte: O autor.

Análise de tendência nas séries temporais de vazão

Inicialmente, o teste de normalidade aplicado às medianas apresentadas na Figura 8, revelou que os dados não seguiam a distribuição normal, indicando que os testes mais adequados correspondem aos não paramétricos. Em seguida, o teste não paramétrico de Wilcoxon-Mann-Whitney verificou que a segregação dos períodos seco (abril – setembro) e úmido (outubro – março) correspondeu ao esperado, de forma que as amostras eram estatisticamente distintas, ou seja, atendendo ao nível de confiança de 95%. Ademais, o teste comprovou que a amostra referente ao período úmido era consistentemente composta por valores maiores de vazão.

Posteriormente, aplicou-se o teste de Mann-Kendall para avaliar a presença de tendências em cada uma das amostras. O comportamento das tendências foi analisado por meio do coeficiente de inclinação angular (m), sendo que: coeficientes positivos indicam tendência de aumento, negativos indicam tendência de diminuição e coeficientes iguais a zero indicam ausência de tendência. Ressalta-se que a identificação de uma tendência só foi possível para amostras que atingiram o nível de confiança estatística de 95%.

Entre as quatro amostras de dados avaliadas, distribuídas entre os períodos seco e úmido nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, três não apresentaram evidências estatisticamente significativas para tendências, ou seja, estiveram abaixo do nível de confiança adotado. Apenas uma amostra apresentou evidências estatisticamente significativas de tendência, como detalhado na Tabela 6. Essa amostra, correspondente ao período seco no cenário SSP2-4.5, apresentou um coeficiente angular de $-0,2 \times 10^{-4}$, caracterizando uma tendência decrescente.

Deve-se enfatizar que uma expectativa de decréscimo nas vazões ao longo do tempo, em um período que naturalmente é mais seco, deve ser entendida como um cenário preocupante para a disponibilidade hídrica na bacia. Uma das razões para isso pode estar intrinsecamente relacionada à redução das chuvas na região da bacia, fato sustentado principalmente pela observação da evolução das normais climatológicas de 1931-1960 e 1961-1990 (Figura 6), onde em dezembro a redução é mais crítica, chegando a um déficit de cerca de 110 mm precipitados. A diminuição das chuvas em momentos do ano em que os aquíferos são reabastecidos, certamente surtirá impactos negativos.

O aumento da temperatura também observado nas estimativas, ora de forma consistente para as mínimas e ora de forma localizada nos meses mais frios para as máximas, pode ser um fator associado à tendência de diminuição das vazões. O aquecimento da superfície terrestre interfere diretamente no

ciclo hidrológico, contribuindo para fatores como a evapotranspiração, a partir do aumento da energia disponível para evaporação da água e aumento na demanda das plantas pelo recurso.

Os resultados de tendência alcançados neste estudo viabilizam para a região um panorama que deve ser acompanhado ao longo do tempo, com monitoramento constante e investimentos em pesquisas do gênero, de forma a produzir insights que fortaleçam ou contraponham os resultados aqui observados, para ampliar o conhecimento da temática para a região. Detalhes derivados dos testes estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6. Resultados e critérios para cada um dos testes executados. Entende-se por: NS - nível de significância adotado; CC - coeficiente de confiança adotado; VP - valor de p obtido (aproximado); m - coeficiente angular obtido; (-) - vazio.

Teste	Amostra	NS	CC	VP	m	Consideração
Shapiro Wilk	SSP2-4.5 - Mediana	0,05	0,95	0,009	(-)	Rejeitou-se H0; distribuição não paramétrica.
	SSP5-8.5 - Mediana	0,05	0,95	0,009	(-)	
Wilcoxon-Mann-Whitney	SSP2-4.5 - Período seco e úmido das medianas	0,05	0,95	0	(-)	Rejeitou-se H0; conclui que as amostras são diferentes.
	SSP5-8.5 - Período seco e úmido das medianas	0,05	0,95	0	(-)	
Mann-Kendall	SSP2-4.5 - Período seco da mediana	0,05	0,95	0,0295	- 0,2 x10 ⁻⁴	Rejeitou-se H0; comprova-se a tendência, com m indicando tendência decrescente.
	SSP2-4.5 - Período úmido da mediana	0,05	0,95	0,239	(-)	Evidência insuficiente para determinar existência de tendência.
	SSP5-8.5 - Período seco da mediana	0,05	0,95	0,393	(-)	
	SSP5-8.5 - Período úmido da mediana	0,05	0,95	0,422	(-)	

Fonte: O autor.

CONCLUSÕES

Este estudo buscou realizar uma análise detalhada das tendências futuras de vazões na bacia hidrográfica da Estação de Tratamento de Água - Rio Grande de Cima. Para isso, foram considerados diferentes cenários de mudanças climáticas, bem como diversos Modelos Climáticos Globais, para um período entre 2030 e 2060.

A calibração do modelo apresentou uma boa correspondência entre as vazões simuladas e os dados históricos. Apesar de uma tendência a superestimar as vazões máximas e subestimar as mínimas, os resultados atenderam aos critérios estatísticos estabelecidos, permitindo que o modelo fosse considerado adequadamente calibrado e validado para as projeções futuras. Sugere-se ainda que estudos semelhantes sejam desenvolvidos também com simulações ao passo mensal, o que possibilitará uma calibração ainda mais eficiente e conseqüentemente projeções mais refinadas.

As projeções climáticas indicaram variações discretas nas precipitações e temperaturas entre os diferentes cenários de mudança climática (SSP) e modelos. As maiores discrepâncias se evidenciaram quando comparadas à normal climatológica de 1931-1960, com destaque para uma significativa redução da precipitação na bacia, especialmente em dezembro, onde a queda atingiu cerca de 100 mm. Durante o período mais úmido, as precipitações médias mensais raramente superaram as normais climatológicas, sugerindo uma tendência de estabilização ou redução das chuvas nos meses tradicionalmente chuvosos. Em termos de temperatura, as projeções apontaram para um claro aumento, sobretudo nos meses mais frios, com destaque para um aquecimento mais acentuado das temperaturas máximas no inverno, e um aumento de até 2 °C nas temperaturas mínimas, particularmente em julho, tanto nos cenários moderados quanto nos extremos.

Essas estimativas de um clima mais seco durante os meses chuvosos, somadas ao aumento projetado das temperaturas, especialmente as mínimas, reforçam as tendências de redução das vazões futuras. No cenário mais próximo aos padrões históricos (SSP2-4.5), a mediana das vazões estimadas

sugeriu, com 95% de confiança, uma redução significativa das descargas durante o período seco (abril – setembro), indicando uma possível intensificação das secas na região.

Esses resultados são de grande relevância para a gestão de recursos hídricos em Nova Friburgo, pois revelam um cenário preocupante para a bacia hidrográfica que abastece a principal ETA da cidade. A redução das vazões, somada ao aumento das temperaturas, ameaça não apenas a disponibilidade hídrica da estação, mas também outras atividades que dependem dos recursos da bacia. Este estudo forneceu dados cruciais para orientar o planejamento estratégico e promover uma gestão adaptativa dos recursos hídricos, diante das mudanças climáticas previstas entre 2030 e 2060.

AGRADECIMENTO

Os autores agradecem ao ClimateAnalyticsGroup e a NASA Ames Research Center, pela disponibilização dos cenários climáticos utilizados, referente ao conjunto de dados NEX-GDDP-CMIP6, preparado usando o NASA Earth Exchange e distribuído pelo NASA Center for ClimateSimulation (NCCS).

REFERÊNCIAS

- Alvarenga, L. A., de Mello, C. R., Colombo, A., Chou, S. C., Cuartas, L. A., Viola, M. R. (2019). Global soil, landuse, evapotranspiration, historical and future weather databases for SWAT Applications. *Scientific Data*, 6(1), 263.
- Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico - ANA. (2017). *Conjuntura Recursos Hídricos Brasil 2017*. Brasília: ANA. Recuperado em 6 de julho de 2023, de <https://www.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/relatorio-conjuntura-2017.pdf/view>
- Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico - ANA. (2023). *Hidroweb: Sistemas de informações hidrológicas*. Recuperado em 1 de novembro de 2023, de <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/apresentacao>
- Alvarenga, L. A., de Mello, C. R., Colombo, A., Chou, S. C., Cuartas, L. A., Viola, M. R. (2018). Impacts of climate change on the hydrology of a Small Brazilian headwater catchment using the distributed hydrology-soil-vegetation model. *American Journal of Climate Change*, 7(2), 355.
- Amorim, P. B., & Chaffe, P. L. B. (2019). Integração de modelos de clima na modelagem hidrológica: o que está acontecendo no Brasil? *RBRH*, 24, e31.
- Andrade, M. P., & Ribeiro, C. B. M. (2020). Impacts of land use and cover change on Paraíba do Sul watershed streamflow using the SWAT model. *RBRH*, 25, e12.
- Arfasa, G. F., Owusu-Sekyere, E., & Doke, D. A. (2024). Climate change projections and impacts on future temperature, precipitation, and stream flow in the Veua Catchment, Ghana. *Environmental Challenges*, 14, 100813.
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., Williams, J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development 1. *Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 73-89.
- Arnold, J. G., Moriasi, D. N., Gassman, P. W., Abbaspour, K. C., White, M. J., Srinivasan, R., Santhi, C., Harmel, R. D., van Griensven, A., Van Liew, M. W., Kannan, N., Jha, M. K. (2012). SWAT: model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*, 55(4), 1491-1508.
- Bressiani, D. A., Gassman, P. W., Fernandes, J. G., Garbossa, L. H. P., Srinivasan, R., Bonumá, N. B., Mendiondo, E. M. (2015). Review of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) applications in Brazil: challenges and prospects. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 8(3), 9-35.
- Brighenti, T. M., Bonumá, N. B., & Chaffe, P. L. B. (2016). Calibração hierárquica do modelo SWAT em uma bacia hidrográfica Catarinense. *RBRH*, 21, 53-64.
- Brighenti, T. M., Bonumá, N. B., Chaffe, P. L. B., Grison, F., Kobiyama, M. (2017). *Análise de sensibilidade como primeiro passo para modelagem hidrológica: Estudo de caso do o modelo SWAT*. In *Anais do Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos* (22, Florianópolis, 2017). Porto Alegre: ABRH. Recurso eletrônico.
- Brown, C. F., Brumby, S. P., Guzder-Williams, B., Birch, T., Hyde, S. B., Mazzariello, J., Czerwinski, W., Pasquarella, V. J., Haertel, R., Ilyushchenko, S., Schwehr, K., Weisse, M., Stolle, F., Hanson, C., Guinan, O., Moore, R., Tait, A. M. (2022). Dynamic World, Near real-time global 10 m land use land cover mapping. *Scientific Data*, 9(1), 251.
- Christiansen, D. E., Haj, A. E., & Risley, J. C. (2017). *Simulation of daily streamflow for 12 river basins in western Iowa using the Precipitation-Runoff Modeling System*. US Geological Survey.
- Crawford, C. G., Slack, J. R., & Hirsch, R. M. (1983). *Nonparametric tests for trends in water-quality data using the statistical analysis system* (106 p.). U.S. Geological Survey. Recuperado em 12 de novembro de 2024, de <https://pubs.usgs.gov/publication/ofr83550>

- Depuy, V., Berger, V. W., Zhou, Y. Y. (2014). *Wilcoxon-Mann-Whitney Test: Overview*. Wiley StatsRef: Statistics Reference Online.
- Dill, J., Dagios, R. N., & Barros, V. G. (2022). Public policies on water resource management and its impacts on the context of climatic changes and alterations in land use and land cover in small and protected rainforest river basins. *Environmental Science & Policy*, 137, 191-204.
- Fukunaga, D. C., Cecílio, R. A., Zanetti, S. S., Oliveira, L. T., Caiado, M. A. C. (2015). Application of the SWAT hydrologic model to a tropical watershed at Brazil. *Catena*, 125, 206-213.
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations: a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2(1), 1-21.
- Gates, W. L. (1985). The use of general circulation models in the analysis of the ecosystem impacts of climatic change. *Climatic Change*, 7(3), 267-284.
- Grupo Águas do Brasil. (2024). *Estação de tratamento de água*. Nova Friburgo. Recuperado em 1 de junho de 2024, de <https://www.grupoaguasdobrasil.com.br/aguas-novafriburgo/agua-e-esgoto/estacao-tratamento-agua/>
- Hamed, K. H. (2008). Trend detection in hydrologic data: the Mann-Kendall trend test under the scaling hypothesis. *Journal of Hydrology (Amsterdam)*, 349(3-4), 350-363.
- Hipel, K. W., & McLeod, A. I. (1994). *Time series modelling of water resources and environmental systems*. Elsevier.
- Hollander, M., Wolfe, D. A., & Chicken, E. (2013). *Nonparametric statistical methods*. John Wiley & Sons.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. (2022). *Cidades e Estados*. Recuperado em 9 de julho de 2023, de <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/rj/nova-friburgo.html>
- Instituto Nacional de Meteorologia – INMET. (2023). *Gráfico Comparativo de Precipitação Acumulada (mm)*. Estação: NOVA FRIBURGO (83745). Recuperado em 1 de outubro de 2023, de <https://clima.inmet.gov.br/GraficosClimatologicos/RJ/83745>
- Instituto Nacional de Meteorologia – INMET. (2024). *Banco de Dados Meteorológicos*. Recuperado em 1 de junho de 2024, de <https://bdmep.inmet.go.br/>
- Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC. (2023). 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* (pp. 1-34). Geneva, Switzerland: IPCC.
- Klemeš, V. (1986). Operational testing of hydrological simulation models. *Hydrological Sciences Journal*, 31(1), 13-24.
- Libiseller, C., & Grimvall, A. (2002). *Performance of partial Mann-Kendall tests for trend detection in the presence of covariates*. *Environmetrics: The Official Journal of the International Environmetrics Society*, 13(1), 71-84.
- Mai, J., Shen, H., Tolson, B. A., Gaborit, É., Arsenault, R., Craig, J. R., Fortin, V., Fry, L. M., Gauch, M., Klotz, D., Kratzert, F., O'Brien, N., Princz, D. G., Rasiya Koya, S., Roy, T., Seglenieks, F., Shrestha, N. K., Temgoua, A. G. T., Vionnet, V., Waddell, J. W. (2022). The great lakes runoff intercomparison project phase 4: the great lakes (GRIP-GL). *Hydrology and Earth System Sciences*, 26(13), 3537-3572.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900.
- National Aeronautics and Space Administration - NASA. (2023). *Alaska Satellite Facility*. Alos Palsar. Data Sets. Recuperado em 5 de setembro de 2023, de <https://asf.alaska.edu/data-sets/sar-data-sets/alos-palsar/>.
- Nguyen, T. V., Dietrich, J., Dang, T. D., Tran, D. A., Doan, B. V., Sarrazin, F. J., Abbaspour, K., Srinivasan, R. (2022). An interactive graphical interface tool for parameter calibration, sensitivity analysis, uncertainty analysis, and visualization for the Soil and Water Assessment Tool. *Environmental Modelling & Software*, 156, 105497.
- O'Neill, B. C., Tebaldi, C., van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R., Kriegler, E., Lamarque, J.-F., Lowe, J., Meehl, G. A., Moss, R., Riahi, K., Sanderson, B. M. (2016). The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9(9), 3461-3482.
- Oliveira, V. A., de Mello, C. R., Viola, M. R., Srinivasan, R. (2017). Assessment of climate change impacts on streamflow and hydropower potential in the headwater region of the Grande river basin, Southeastern Brazil. *International Journal of Climatology*, 37(15), 5005-5023.

- Passos, F. O., Silva, B. C., & Silva, F. G. B. (2021). Avaliação de impactos de mudanças no uso e manejo do solo sobre as vazões da Bacia Hidrográfica do Ribeirão José Pereira, utilizando o modelo SWAT. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 14(2), 619-633.
- Ramalho Filho, A., & Beek, K. J. (1995). *Sistema de avaliação da aptidão agrícola das terras*. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPQ.
- Royston, J. P. (1982). An extension of Shapiro and Wilk's *W* test for normality to large samples. *Journal of the Royal Statistical Society. Series C, Applied Statistics*, 31(2), 115-124.
- Santos, H. G. dos, Carvalho Junior, W. de, Dart, R. de O., Aglio, M. L. D., Souza, J. S. de, Pares, J. G., Fontana, A., Martins, A. L. da S., Oliveira, A. P. de. (2011). *O novo mapa de solos do Brasil: legenda atualizada*. Rio de Janeiro: Embrapa Solos (Embrapa Solos. Documentos, 130, 67 p.). 1 mapa, color. Escala 1:5.000.000. Recuperado em 5 de setembro de 2023, de http://geoinfo.cnps.embrapa.br/layers/geonode%3Abrasil_solos_5m_20201104.
- Shapiro, S. S., Wilk, M. B., & Chen, H. J. (1968). A comparative study of various tests for normality. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1343-1372.
- Siqueira, P. P., Oliveira, P. T. S., Bressiani, D., Neto, A. A. M., Rodrigues, D. B. (2021). Effects of climate and land cover changes on water availability in a Brazilian Cerrado basin. *Journal of Hydrology. Regional Studies*, 37, 100931.
- Thrasher, B., Wang, W., Michaelis, A., Melton, F., Lee, T., Nemani, R. (2021). *NEX-GDDP-CMIP6. NASA Center for Climate Simulation*. Recuperado em 1 de fevereiro de 2024, de <https://nex-gddp-cmip6.s3.us-west-2.amazonaws.com/index.html>
- Thrasher, B., Wang, W., Michaelis, A., Melton, F., Lee, T., Nemani, R. (2022). NASA global daily downscaled projections, CMIP6. *Scientific Data*, v. 9, n. 1, p. 262. Recuperado em 1 de fevereiro de 2024, de https://www.nccs.nasa.gov/sites/default/files/NEX-GDDP-CMIP6-Tech_Note_4.pdf
- Tobin, K. J., & Bennett, M. E. (2009). Using SWAT to Model Streamflow in Two River Basins With Ground and Satellite Precipitation Data 1. *Journal of the American Water Resources Association*, 45(1), 253-271.
- Tucci, C. E. M. (2005). *Modelos hidrológicos* (2. ed.), Porto Alegre: ABRH / Editora da Universidade (UFRGS).
- United States Environmental Protection Agency - USEPA. (2022). *ProUCL: Software Estatístico para Aplicações Ambientais para Conjuntos de Dados com e sem Observações Não Detectadas*. Versão 5.2. <https://www.epa.gov/land-research/proucl-software>.
- Yilmaz, M. U., & Onoz, B. (2020). A comparative study of statistical methods for daily streamflow estimation at ungauged basins in Turkey. *Water (Basel)*, 12(2), 459.
- Zarrineh, N., Abbaspour, K. C., & Holzkämper, A. (2020). Integrated assessment of climate change impacts on multiple ecosystem services in Western Switzerland. *The Science of the Total Environment*, 708, 135212.

Contribuições dos autores:

Matheus Lima Gravino Passos: desenvolvimento do estudo em todas as frentes (modelagem, simulação e análise).

Celso Bandeira de Melo Ribeiro: revisões e correções técnicas e textuais, além de fornecer direcionamentos estratégicos para a pesquisa no âmbito da hidrologia.

Aline Sarmento Procópio: revisões e correções técnicas e textuais, além de fornecer direcionamentos estratégicos para a pesquisa no âmbito da climatologia e mudanças climáticas.

Marcel Pereira de Andrade: modelagem hidrológica com o SWAT, além de fornecer direcionamentos na calibração e validação junto ao R-SWAT.