1º HIDROGEOMINAS
SIMPÓSIO MINEIRO DE HIDROGEOMORFOLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS
07 – 10 de setembro de 2026
Departamento de Geografia – UFMG
Belo Horizonte - MG

Modelagem hidrológica integrada da disponibilidade hídrica e da qualidade da água na bacia do rio Umbeluzi utilizando o modelo SWAT

Samuel José Marquês Timano [1]
José Luísa João Chaora [2]
Mateus Pimentel de Matos [3]
Michael Silveira Thebaldi [4]
Daniel Enrique Mellado Gualardo [5]
Frank Duarte Ussivane [6]

RESUMO

A crescente pressão sobre os recursos hídricos em regiões tropicais tem intensificado a necessidade de ferramentas capazes de avaliar, de forma integrada, a disponibilidade hídrica e a qualidade da água. Nesse contexto, este estudo avaliou a dinâmica hidrológica e a qualidade da água na bacia do rio Umbeluzi por meio do modelo SWAT, com ênfase na estimativa de vazões de referência. A modelagem eco-hidrológica indicou precipitação média anual de 752 mm, com predominância de perdas por evapotranspiração (49%), seguida pelo escoamento superficial (22%), escoamento de base (18%) e recarga (8%), evidenciando forte controle climático sobre a disponibilidade hídrica. O modelo apresentou desempenho satisfatório na simulação das vazões, com NSE de 0,83 na calibração e 0,73 na validação, e KGE de 0,64 e 0,60, respectivamente. A curva de permanência demonstrou boa concordância entre vazões observadas e simuladas, com excelente ajuste para condições de estiagem (Q7,10 = 6,46 m³/s). As vazões de referência simuladas, Q90 (14,54 m³/s) e Q95 (11,98 m³/s), evidenciaram confiabilidade na estimativa da disponibilidade hídrica em períodos críticos, enquanto as vazões máximas, Q5 (83,52 m³/s) e Q10 (65,79 m³/s), indicaram tendência de superestimação dos eventos de cheia. A análise da qualidade da água evidenciou degradação progressiva no sentido Goba – Umbeluzi Agrícola, com melhores condições em montante e deterioração nas áreas mais antropizadas, sendo as estações Umbeluzi Particular e Umbeluzi Agrícola as mais impactadas, com maiores valores de nitrogênio total e coliformes, associados à redução do oxigênio dissolvido, refletindo a influência da expansão urbana e das atividades agrícolas. Esses resultados demonstraram que o modelo SWAT representou de maneira consistente a dinâmica hidrológica e a qualidade da água, destacando o papel do uso e ocupação do solo e reforçando a importância das vazões de referência como suporte à gestão hídrica em cenários de variabilidade climática.

Palavras-chave: vazões de referência; disponibilidade hídrica; poluição difusa; uso e cobertura do solo.

1. INTRODUÇÃO

A crescente pressão sobre os recursos hídricos tem intensificado os desafios relacionados à gestão sustentável da água, especialmente em regiões tropicais e subtropicais, em que a elevada

[1] Doutorando do Curso de Recursos Hídricos da Universidade Federal de Lavras - UFLA, samuel.timano1@estudante.ufla.br;
[2] Doutorando do Curso de Recursos Hídricos da Universidade Federal de Lavras - UFLA, jose.chaora@estudante.ufla.br;
[3] Professor, Doutor do Curso de Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, mateus.matos@ufla.br;
[4] Professor, Doutor pelo Curso de pelo Curso de Recursos Hídricos da Universidade Federal de Lavras - UFLA, michael.thebaldi@ufla.br;
[5] Doutorando em Recursos Hídricos da Universidade Federal de Lavras - UFLA, daniel.mellado1@estudante.ufla.br;
[6] Doutorando em Recursos Hídricos da Universidade Federal de Lavras - UFLA, frank.ussivane@estudante.ufla.br;

variabilidade climática, associada às mudanças no uso e cobertura do solo, influencia diretamente a disponibilidade hídrica e a qualidade da água (Hoang *et al*., 2019). Nesse contexto, a ocorrência de eventos hidrológicos extremos, como secas prolongadas e cheias intensas, tem se tornado mais frequente e severa, comprometendo o abastecimento humano, a produção agrícola e a integridade dos ecossistemas aquáticos, além de aumentar a vulnerabilidade socioeconômica das populações dependentes desses recursos (Kausher *et al*., 2024).

Em bacias hidrográficas africanas, esses desafios são ainda mais acentuados devido à rápida expansão urbana, intensificação das atividades agrícolas e limitações nos sistemas de monitoramento hidrológico e de qualidade da água (Arsenault *et al*., 2023; Hughes; Farinosi, 2020). Esses fatores contribuem para alterações no regime de vazões, aumento da variabilidade hidrológica e incremento das cargas de poluentes, dificultando a previsão e a gestão de eventos extremos. Além disso, a escassez de séries históricas contínuas e confiáveis limita a aplicação de métodos tradicionais de análise, tornando necessária a adoção de ferramentas capazes de integrar diferentes processos hidrológicos e ambientais (Beven, Keith, 2020).

A modelagem eco-hidrológica surge, como uma abordagem robusta para compreender a dinâmica dos processos que controlam o ciclo hidrológico e o transporte de sedimentos e poluentes em bacias hidrográficas e entre os modelos disponíveis, o Soil and Water Assessment Tool (SWAT) que destaca-se pela sua capacidade de simular, de forma distribuída, os processos hidrológicos em diferentes escalas espaciais e temporais, permitindo avaliar o impacto de mudanças no uso do solo e de cenários climáticos sobre a disponibilidade hídrica e a qualidade da água (Viana *et al.*, 2018). Além disso, o modelo auxilia a gestão hídrica ao permitir o uso de seus resultados na estimativa de indicadores de disponibilidade, como Q90, Q95 e Q7,10, aplicados na outorga, planejamento de abastecimento e alocação de água, especialmente em cenários de variabilidade climática e eventos extremos (Gassman *et al*., 2007).

Apesar dos avanços no uso de modelos hidrológicos, ainda são limitados os estudos que integrem, de forma consistente, a simulação da disponibilidade hídrica com a avaliação da qualidade da água e a análise de indicadores hidrológicos voltados à gestão de eventos extremos, especialmente em bacias hidrográficas africanas, lacuna particularmente relevante na bacia do rio Umbeluzi, que possui elevada importância estratégica para o sul de Moçambique, sendo responsável pelo abastecimento da Região Metropolitana de Maputo e pelo suporte às atividades agrícolas e industriais. A crescente pressão antrópica, associada à variabilidade climática, torna essa bacia especialmente vulnerável a alterações no regime hidrológico e à degradação da qualidade da água.

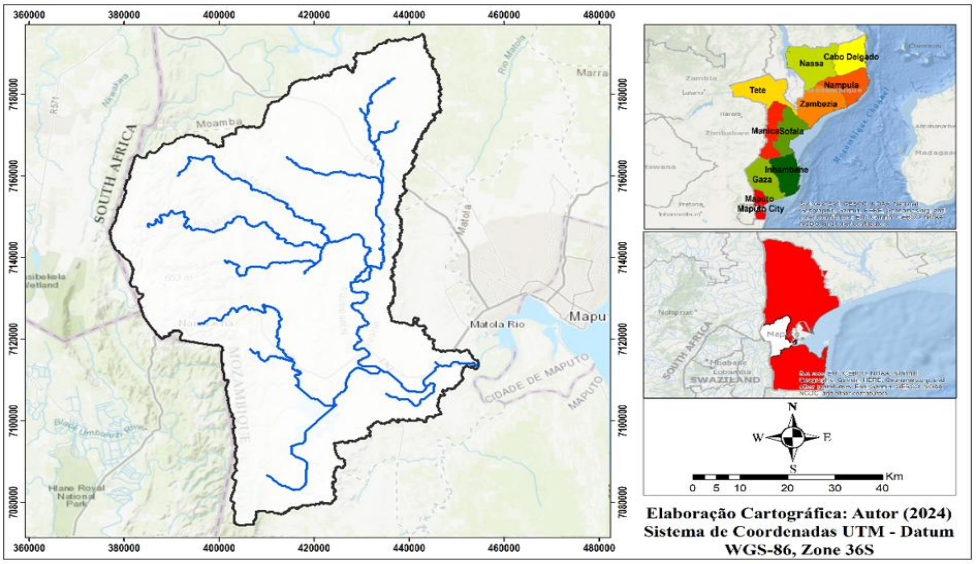
Diante desse contexto, este estudo teve como objetivo aplicar a modelagem eco-hidrológica com o modelo SWAT para avaliar, de forma integrada, a disponibilidade hídrica e a qualidade da água na bacia do rio Umbeluzi, com ênfase na estimativa de vazões de referência e na análise dos impactos do uso e ocupação do solo.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Caracterização da área de estudo

A bacia hidrográfica do rio Umbeluzi é uma bacia transfronteiriça localizada no sul de Moçambique e compartilhada com ESwatini e África do Sul, com área aproximada de 2.268,23 km^2 em Moçambique. A porção moçambicana situa-se na província de Maputo entre as coordenadas 26°00'–26°45' S e 32°00'–32°45', abrangendo os distritos de Namaacha, Boane, Moamba e parte da cidade da Matola, desempenhando papel estratégico no abastecimento de água da Região Metropolitana de Grande Maputo e na irrigação agrícola (ARASUL, 2020). A bacia apresenta clima subúmido do tipo Am, com precipitação média anual de 752 mm, concentrada entre novembro e março, e temperatura média anual de 23,7 °C.

Figura 2.1 – Localização geográfica da bacia hidrográfica do rio Umbeluzi



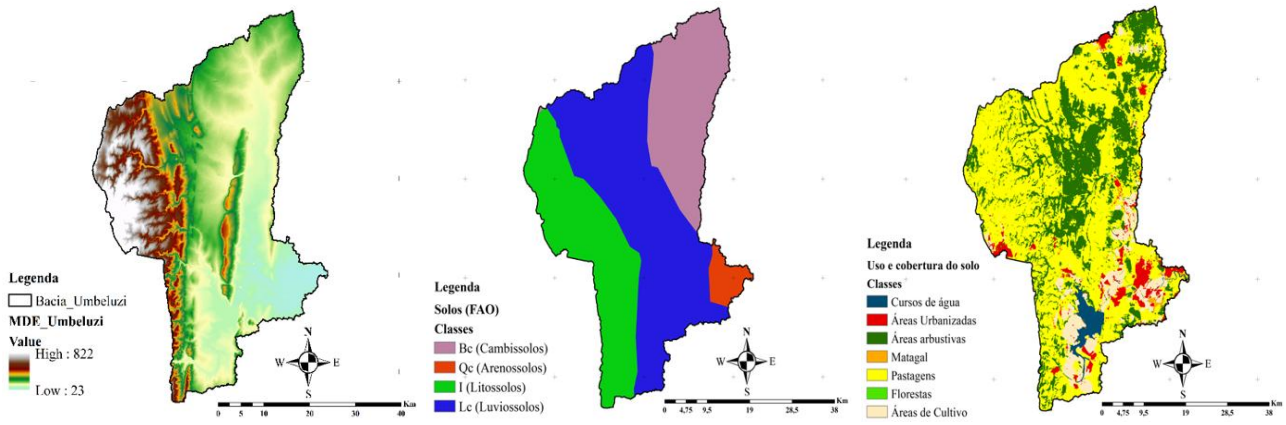
Fonte: Timano (2025).

2.2 Estruturação de dados

A entrada de dados para a modelagem eco-hidrológica foi realizada em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG), integrando variáveis físicas, climáticas e ambientais necessárias para a simulação no modelo SWAT. Foram utilizados dados de relevo, solos, uso e cobertura da terra, rede de drenagem e séries hidrometeorológicas.

A delimitação da bacia hidrográfica e a extração das unidades fisiográficas foram realizadas com base no Modelo Digital de Elevação (MDE) ALOS PALSAR, com resolução espacial de 12,5 m, adequado para representar a variabilidade do relevo da bacia do rio Umbeluzi, cuja altitude varia entre 23 e 822 m (JAXA, 2021). As informações de solos foram obtidas a partir do mapa da FAO/UNESCO (1974), e complementadas por dados pedológicos nacionais, permitindo a identificação das principais classes, nomeadamente Cambissolos, Arenossolos, Litossolos e Luvissolos. O uso e cobertura da terra foi derivado de imagens Sentinel-1 e Sentinel-2 da base ESA WorldCover (ESA, 2021), sendo classificado em sete categorias principais, incluindo áreas agrícolas, florestas, pastagens, arbustos, corpos hídricos e áreas urbanizadas, fundamentais para a parametrização do modelo hidrológico.

Figura 2.2 – Mapas temáticos de distribuição espacial dos componentes de entrada do modelo SWAT: a) MDE; b) Mapa de tipos de solo; c) Mapa de uso e cobertura do solo.



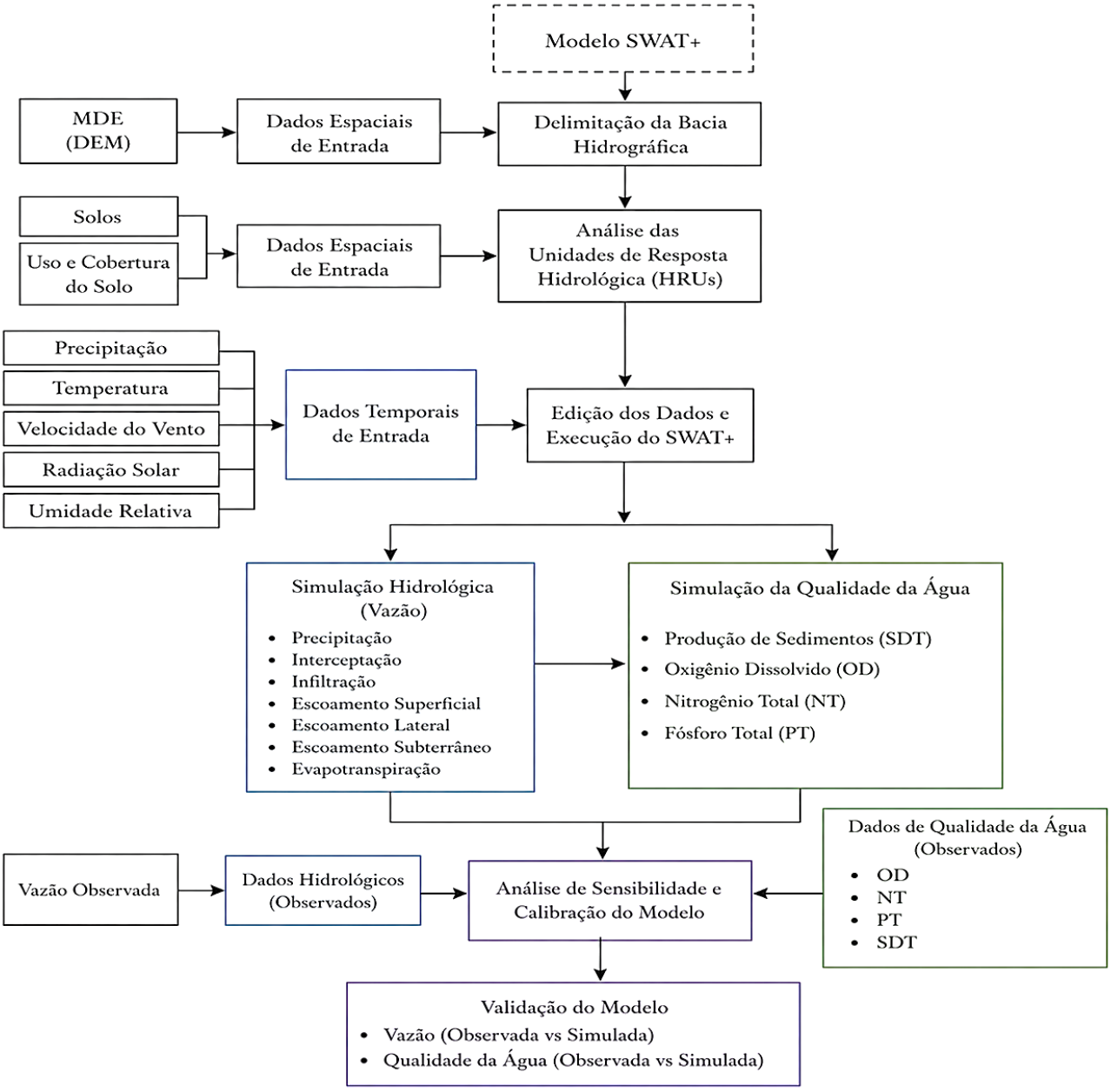
Os dados hidrometeorológicos foram obtidos do INAM e da ARASUL (2024), incluindo séries diárias de precipitação, temperatura máxima e mínima, radiação solar, umidade relativa, velocidade do vento e vazão, garantindo consistência na simulação do balanço hídrico. Adicionalmente, foram utilizados dados de qualidade da água monitorados durante um período de 10 anos proveniente de 5 estações de monitoramento: Goba, Namaacha, Massingir, Umbeluzi Agrícola e Umbeluzi Particular, contemplando variáveis como oxigênio dissolvido (OD), pH, turbidez, nitrato, fósforo, sólidos totais e coliformes termotolerantes, permitindo avaliar a dinâmica da qualidade da água e apoiar a modelagem eco-hidrológica na bacia.

2.3 Modelagem

Utilizou-se o modelo SWAT para simular o balanço hídrico da bacia do rio Umbeluzi, integrando informações hidrológicas e variáveis de qualidade da água, com o objetivo de estimar os

principais componentes do ciclo hidrológico e analisar a dinâmica da qualidade da água na bacia, sendo a metodologia aplicada apresentada na Figura 2.3.

Figura 2.3 – Arcabouço metodológico do modelo SWAT para modelagem hidrológica



Fonte: Autores, (2026).

Durante a modelagem, a bacia foi discretizada em 27 sub-bacias e 504 HRUs, permitindo a simulação dos principais componentes do ciclo hidrológico, bem como de sedimentos, nutrientes e variáveis de qualidade da água.

O estudo foi conduzido para o período de 1995 a 2023, considerando 1995 como período de aquecimento, 1996 a 2018 para calibração e 2019 a 2023 para validação do modelo. A análise de

sensibilidade, calibração e validação foram realizadas no SWAT-CUP, utilizando o método SUFI-2, com quantificação das incertezas por meio do intervalo de predição de 95% (95PPU), representado pelos indicadores P-factor e R-factor. O desempenho do modelo foi avaliado com base nos coeficientes NSE, KGE e PBIAS, recomendados por Moriasi (2014) e Kling Gupta (2008), considerando séries de vazão.

Adicionalmente, a avaliação da qualidade da água foi realizada com base em dados observados no período de 2014 a 2023, utilizados para verificar a capacidade do modelo em representar a dinâmica espacial dos parâmetros de qualidade da água ao longo da bacia.

Os resultados das simulações foram posteriormente empregados na análise do regime hidrológico, incluindo a construção da curva de permanência e a estimativa de vazões de referência, bem como na avaliação espacial da qualidade da água, permitindo a integração entre disponibilidade hídrica e condições ambientais.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A simulação hidrológica com o modelo SWAT na bacia do rio Umbeluzi indicou precipitação média anual de 752 mm, com maior concentração nas áreas de maior altitude, evidenciando a influência do relevo na distribuição espacial das chuvas. Do total precipitado, aproximadamente 49% foram perdidos por evapotranspiração, 22% convertidos em escoamento superficial, 18% em escoamento de base e 8% destinados à recarga do lençol freático, indicando que a disponibilidade hídrica da bacia é fortemente controlada pelas perdas atmosféricas.

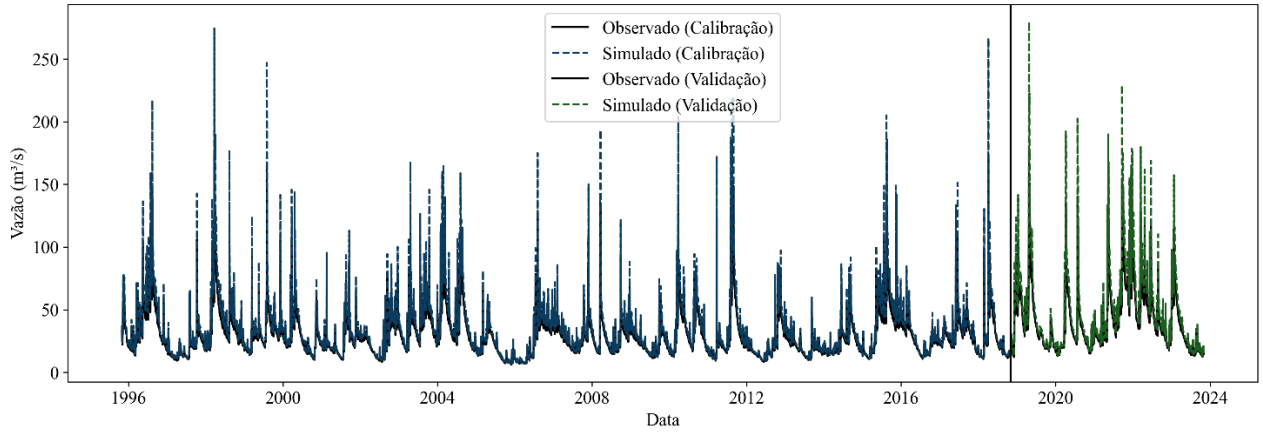
O hidrograma demonstrou que o modelo SWAT foi capaz de reproduzir de forma satisfatória a variabilidade temporal das vazões, incluindo o padrão sazonal característico da região. Na calibração, os indicadores estatísticos apresentaram bom desempenho (NSE = 0,83; KGE = 0,64; PBIAS = -13%), dentro dos limites recomendados pelo Moriasi *et al*., (2014). Na validação, o modelo manteve desempenho consistente (NSE = 0,73; KGE = 0,60, PBIAS = -15%), indicando robustez e boa capacidade de generalização, sem evidência de sobreajuste.

Os resultados obtidos são comparáveis aos encontrados em estudos realizados em bacias tropicais e subtropicais, como Mengistu *et al*. (2019) na Etiópia (NSE = 0,71), Akoko *et al*. (2021) na África do Sul (NSE = 0,75). Essa consistência reforça a confiabilidade do modelo SWAT para simulação hidrológica em diferentes condições climáticas.

Entretanto, a análise detalhada do hidrograma evidenciou uma tendência sistemática de superestimação dos picos de vazão, especialmente durante eventos de maior magnitude. Esse comportamento indica que o modelo tende a amplificar a resposta hidrológica da bacia, produzindo

vazões máximas superiores às observadas, devendo isso estar associado à parametrização dos processos de geração de escoamento superficial, particularmente ao CN2, bem como à representação da infiltração e do SOL_AWC, que influenciam diretamente o volume de escoamento gerado.

Figura 3.1 – Calibração e validação do modelo SWAT para vazão na Bacia do rio Umbeluzi

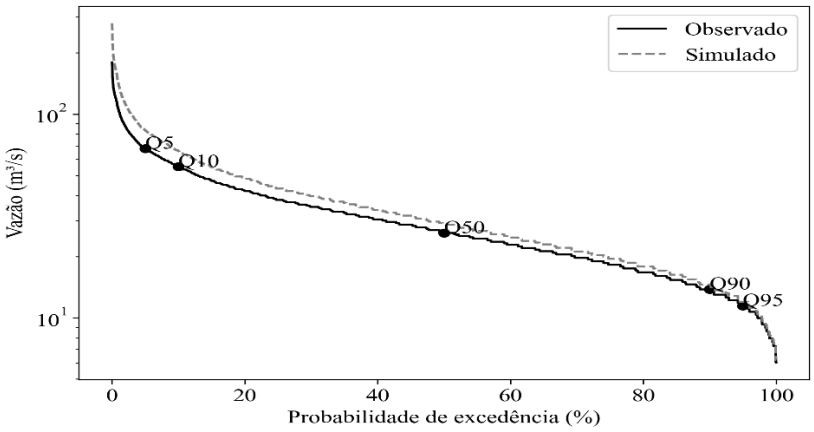


Fonte: Autores, (2026).

A curva de permanência demonstrou boa concordância entre as vazões observadas e simuladas ao longo da distribuição, indicando adequada representação do regime hidrológico da bacia. As vazões de baixa magnitude foram bem representadas, com Q90 = 14,54 m^3/s e Q95 = 11,98 m^3/s, além de excelente ajuste para Q7,10 = 6,46 m^3/s, evidenciando alta confiabilidade do modelo na estimativa da disponibilidade hídrica em períodos de estiagem. Esses indicadores são amplamente utilizados na gestão de recursos hídricos para definição de vazões de referência, concessão de outorgas e manutenção de vazões ecológicas, sendo essenciais para o planejamento do abastecimento e garantia dos usos múltiplos da água (ANA, 2013; von Sperling, 2014).

Por outro lado, as vazões de maior magnitude apresentaram superestimação, com Q5 = 83,52 m^3/s e Q10 = 65,79 m^3/s, indicando tendência do modelo em intensificar eventos de cheia. Do ponto de vista da gestão hídrica, essa condição pode levar à superavaliação da disponibilidade hídrica em períodos chuvosos e influenciar o dimensionamento de obras hidráulicas e estratégias de controle de cheias. Assim, embora o modelo apresente bom desempenho geral, recomenda-se cautela na utilização das vazões máximas simuladas em análises relacionadas a eventos extremos (Tucci, 2002).

Figura 3.2 – Curva de permanência das vazões observadas e simuladas



Fonte: Autores, (2026).

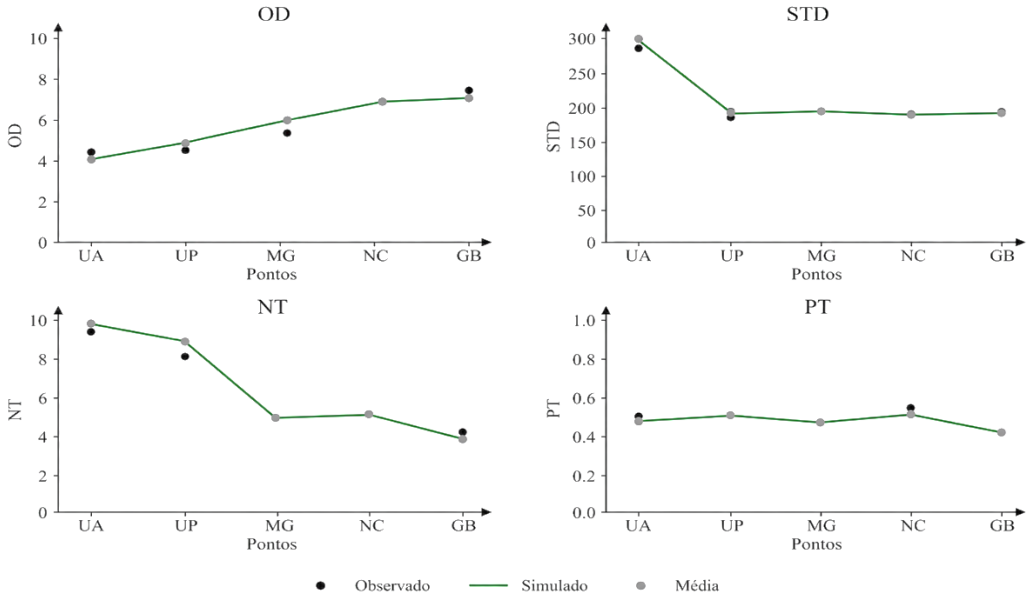
3.2 Dinâmica espacial da qualidade de água

A qualidade da água na bacia do rio Umbeluzi apresentou um padrão espacial de degradação no sentido Goba (GB) → Namaacha (NC) → Massingir (MG) → Umbeluzi Particular (UP) → Umbeluzi Agrícola (UA), com melhores condições nas áreas de montante e deterioração progressiva em direção às regiões mais antropizadas. As estações GB e NC destacaram-se por apresentar maiores concentrações de oxigênio dissolvido e menores valores de nutrientes, refletindo baixa pressão antrópica e maior capacidade de autodepuração. Em contraste, as estações UP e UA evidenciaram condições mais degradadas, com aumento das concentrações de nitrogênio total, associado à redução do oxigênio dissolvido.

Esse comportamento está relacionado ao incremento das cargas orgânicas e de nutrientes ao longo do curso do rio, conforme discutido por von Sperling (2014), bem como ao aporte difuso proveniente das atividades agrícolas, conforme Matos e Matos (2012). Estudos recentes (Hoang *et al*., 2019; Kausher *et al*., 2024) corroboram que a urbanização e o uso intensivo do solo promovem a degradação cumulativa da qualidade da água em direção da área mais urbanizada. No presente estudo, a degradação observada em UP está associada à expansão urbana e à deficiência de saneamento, enquanto em UA predomina a influência das atividades agrícolas.

Sob a perspectiva da gestão hídrica, os resultados evidenciam a necessidade de controle integrado de fontes pontuais e difusas de poluição, com ênfase na ampliação do saneamento em áreas urbanas e na adoção de práticas agrícolas conservacionistas, visando reduzir a carga de nutrientes e preservar a qualidade da água ao longo da bacia.

Figura 3.3 – Distribuição espacial de variáveis de qualidade da água ao longo do rio Umbeluzi



Fonte: Autores, (2026).

4. CONCLUSÃO

A modelagem eco-hidrológica com o SWAT mostrou bom desempenho na representação da dinâmica hidrológica e da qualidade da água na bacia do rio Umbeluzi, evidenciando seu potencial como ferramenta de apoio à gestão hídrica.

A disponibilidade hídrica é fortemente controlada pela evapotranspiração, enquanto a qualidade da água é influenciada pelo uso e ocupação do solo, com melhores condições em montante e degradação em jusante, associada à expansão urbana e agrícola, o que reforça a necessidade de gestão integrada, com foco no saneamento, controle agrícola e conservação do solo para garantir a sustentabilidade dos recursos hídricos.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem pela concessão de bolsa pela FAPEMIG e pelo apoio financeiro prestado ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e para participação no evento pela FAPEMIG e CAPES (código 001).

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Akoko, G. *et al.* A review of SWAT model application in Africa**.** Water, Suíça, v. 13, n. 9, 2021. https://doi.org/10.3390/w13091313

ARASUL. *Relatório técnico sobre a bacia hidrográfica do rio Umbeluzi*. Maputo: ARASUL, 2024.

ARSENAULT, R. et al. Continuous streamflow prediction in ungauged basins: long short-term memory neural networks clearly outperform traditional hydrological models. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 27, n. 1, p. 139–157, 2023. DOI: https://doi.org/10.5194/hess-27-139-2023.

BEVEN, Keith. How to make advances in hydrological modelling. In: _____. *Hydrology: advances in theory and practice*. London: IWA Publishing, 2020. p. 19–32. DOI: https://doi.org/10.2166/nh.2019.134.

BUI, H. H. et al. Integration of SWAT and QUAL2K for water quality modeling in a data scarce basin of Cau River basin in Vietnam. *Ecohydrology and Hydrobiology*, v. 19, n. 2, p. 210–223, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2019.03.005.

EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA). *ESA WorldCover 10 m 2021 v200*. Paris: ESA, 2021. Disponível em: https://worldcover2021.esa.int. Acesso em: 8 maio 2026.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO); UNITED NATIONS EDUCATIONAL, SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION (UNESCO). *Soil map of the world*. Paris: UNESCO, 1974.

GASSMAN, P. W. et al. The Soil and Water Assessment Tool: historical development, applications, and future research directions. *Transactions of the ASABE*, v. 50, n. 4, p. 1211–1250, 2007. Disponível em: http://www.nrcs.usda.gov/technical/NRI/ceap/. Acesso em: 8 maio 2026.

HUGHES, D. A.; FARINOSI, F. Assessing development and climate variability impacts on water resources in the Zambezi River basin: simulating future scenarios of climate and development. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, v. 32, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100763.

JAPAN AEROSPACE EXPLORATION AGENCY (JAXA). *ALOS PALSAR Radiometric Terrain Corrected high resolution data set*. Tokyo: JAXA, 2021. Disponível em: https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/dataset/fnf_e.htm. Acesso em: 8 maio 2026.

KAUSHER, M.; KHAN, S.; IQBAL, J. Hydrological modeling and simulation of water balance in mining-impacted watersheds. *Environmental Earth Sciences*, v. 82, n. 3, p. 98, 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/s12665-023-10811-0.

MATOS, A. T.; MATOS, M. O. *Tratamento e uso de águas residuárias para fins agrícolas*. Viçosa: Editora UFV, 2017.

MENGISTU, A. G.; VAN RENSBURG, L. D.; WOYESSA, Y. E. Techniques for calibration and validation of SWAT model in data scarce arid catchments in South Africa. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, Holanda, v. 25, p. 100621, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/J.EJRH.2019.100621.

TIMANO, S. J. M. *Modelagem da qualidade de água na bacia hidrográfica do rio Umbeluzi – Moçambique: integração dos modelos SWAT e QUAL-UFMG*. 2025. 137 f. Dissertação (Mestrado Acadêmico em Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2025.

TUCCI, Carlos E. M. *Hidrologia: ciência e aplicação*. Porto Alegre: Editora UFRGS, 2007.

VIANA, J. F. de S. et al. Modelagem hidrológica da Bacia Hidrográfica do Rio Pirapama-PE utilizando o modelo SWAT. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, p. 155–172, 2018. DOI: https://doi.org/10.24221/jeap.3.1.2018.1709.155-172.

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