

# MODELAGEM HIDROLÓGICA DA BACIA DO RIO ICONHA – ES: POTENCIALIDADES, DESAFIOS E SOLUÇÕES PARA PEQUENAS BACIAS HIDROGRÁFICAS

*HYDROLOGICAL MODELING OF THE ICONHA RIVER BASIN –ES (BRAZIL): POTENTIALITIES, CHALLENGES AND SOLUTIONS FOR SMALL WATERSHEDS*

*MODELIZACIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO ICONHA – ES (BRASIL): POTENCIALIDADES, DESAFÍOS Y SOLUCIONES PARA PEQUEÑAS CUENCAS*

**Fábio Luiz Mação Campos**

Instituto Federal do Espírito Santo (IFES)  
fabiomacao@gmail.com

**Mariana Soares Domingues**

Universidade Estadual de Minas Gerais (UEMG)  
mariana.domingues@uemg.br

**André Luiz Nascentes Coelho**

Universidade Federal do Espírito Santo (UFES)  
alnc.ufes@gmail.com

**Danielle de Almeida Bressiani**

Universidade Federal de Pelotas (UFPeL)  
daniebressiani@gmail.com

## RESUMO

As modelagens hidrológicas são amplamente utilizadas em vários estudos e pesquisas para a gestão de recursos hídricos, tendo sido desenvolvidas para enfrentar os desafios e os diferentes níveis de complexidade das bacias de drenagem. Nesse contexto, o objetivo deste artigo é demonstrar o uso da modelagem hidrológica com o SWAT+ (Soil and Water Assessment Tool Plus) como ferramenta para a simulação de processos e a análise ambiental em pequenas bacias hidrográficas, destacando desafios e soluções encontrados para uma modelagem satisfatória. Para isso, a bacia hidrográfica do Rio Iconha, localizada no estado do Espírito Santo (Brasil), foi usada como exemplo, executando-se sua modelagem, calibração e validação. Fica demonstrado que os principais desafios estão ligados à carência de dados espaciais em escala adequada e à disponibilidade de dados de monitoramento para a validação da modelagem. Por outro lado, a versatilidade de simulação de cenários e a capacidade de representação dos aspectos quantitativos ligados aos diversos processos hidrossedimentológicos são destacadas como os principais pontos positivos do SWAT+. Assim, a modelagem hidrológica surge como uma alternativa para a quantificação de diversas variáveis, entradas e saídas do sistema, principalmente no que tange às demandas de aplicação e avaliação de métodos e conceitos associados ao planejamento de bacias hidrográficas.

**PALAVRAS-CHAVE:** modelo hidrológico; recursos hídricos; análise quantitativa.

## ABSTRACT

Hydrological models have been developed to meet the challenges and various levels of complexity of the watershed and are widely used in various studies and research for water resource management. In this context, the aim of this paper is to demonstrate the use of hydrological modeling with SWAT+ (Soil and Water Assessment Tool Plus) as a tool for simulating processes and environmental analysis in small watersheds, highlighting the challenges and solutions found for satisfactory modeling. For this, the Iconha watershed, located in the state of Espírito Santo (Brazil), was used as an example, and its modeling, calibration and validation were carried out. It was shown that the main challenges are linked to the lack of spatial data at an adequate scale and the availability of monitoring data to validate the modeling. On the other hand, SWAT+'s versatility for simulating scenarios and its ability to represent quantitative aspects linked to the various hydrosedimentological processes are highlighted as its main positive points. Thus, hydrological modeling

has emerged as an alternative for quantifying various variables, inputs and outputs of the system, especially about the demands of applying and evaluating methods and concepts associated with river basin planning.

**KEYWORDS:** hydrological model; water resources; quantitative analysis.

## RESUMEN

Los modelos hidrológicos se desarrollaron para abordar los desafíos y los diversos niveles de complejidad de la cuenca, y se utilizan ampliamente en diversos estudios e investigaciones para la gestión de los recursos hídricos. En este contexto, el objetivo de este artículo es demostrar el uso de la modelación hidrológica con SWAT+ (Soil and Water Assessment Tool Plus) como herramienta para la simulación de procesos y el análisis ambiental en pequeñas cuencas fluviales, resaltando los desafíos y soluciones encontradas para una modelación satisfactoria. Para ello, se utilizó como ejemplo la cuenca del río Iconha, ubicada en el estado de Espírito Santo (Brasil), realizando su modelación, calibración y validación. Se ha demostrado que los principales desafíos están vinculados a la falta de datos espaciales a una escala adecuada y a la disponibilidad de datos de monitoreo para validar el modelado. Por otro lado, se destacan como los principales puntos positivos de SWAT+ la versatilidad para simular escenarios y la capacidad de representar aspectos cuantitativos vinculados a los distintos procesos hidrosedimentológicos. Así, la modelación hidrológica surge como una alternativa para cuantificar diversas variables, entradas y salidas del sistema, principalmente en lo que respecta a las demandas de aplicación y evaluación de métodos y conceptos asociados a la planificación de cuencas.

**PALABRAS CLAVE:** modelo hidrológico; recursos hídricos; análisis cuantitativo.

## 1. INTRODUÇÃO

A modelagem hidrológica é uma importante ferramenta para simular os processos de uma bacia hidrográfica (Andrade; Ribeiro, 2020) e surge como uma alternativa para quantificação de diversas variáveis, entradas e saídas do sistema, principalmente no que tange às demandas de aplicação e avaliação de métodos e conceitos ao planejamento hidrológico e ambiental.

Os modelos hidrológicos foram desenvolvidos para enfrentar os desafios e vários níveis de complexidade da bacia hidrológica (Kauffeldt *et al.*, 2016) e são amplamente utilizados em vários estudos e pesquisas para a gestão de recursos hídricos (Shiferaw *et al.*, 2018). Eles são considerados, na atualidade, uma ferramenta importante e necessária para a gestão dos recursos hídricos e ambientais (Devia; Ganasri; Dwarakish, 2015), fornecendo estimativas espaciais e temporais valiosas, ajudando a analisar possíveis projeções e cenários (Sood; Smakhtin, 2015), pois permitem simulações e previsões, muitas vezes diferentes das condições possibilitadas pela observação direta (Rodrigues; Adami, 2010). A modelagem hidrológica tornou-se uma alternativa extremamente útil, uma vez que contribui para entender o impacto das mudanças no uso e cobertura da terra e prevê alterações futuras nos ecossistemas.

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é realizar a modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do Rio Iconha, localizada no estado do Espírito Santo, com o modelo SWAT+ (*Soil and Water Assessment Tool Plus*) e evidenciar como essa ferramenta pode auxiliar processos de análise hídrica e ambiental em pequenas bacias hidrográficas. Pretende-se, ainda, demonstrar os desafios

e soluções para criação de um cenário que simule satisfatoriamente os processos hidrossedimentológicos da bacia diante da reconhecida escassez de dados existentes no Brasil.

## 2. MODELO SWAT+ E SUA UTILIDADE PARA PESQUISAS EM RECURSOS HÍDRICOS E PLANEJAMENTO AMBIENTAL

A geração de dados e a elaboração de estudos e diagnósticos podem subsidiar planos de ação para contornar ou prevenir potenciais conflitos pelo uso da água. Esses estudos vão desde simples interpolações para estimar a precipitação e equações para estimativa da vazão, como o método racional, até modelagens altamente complexas que envolvem questões multifacetadas.

O SWAT é um modelo de distribuição gratuita desenvolvido pela USDA – *Agricultural Research Service* em parceria com a *Texas A & M University* e se destaca por ser um dos modelos mais utilizados no mundo, aplicado para solução de uma ampla gama de problemas em bacias hidrográficas de várias escalas (Gassman; Sadeghi; Srinivasan, 2014). Com a capacidade de simular a vazão hídrica, a perda e o transporte de sedimentos e de nutrientes, o SWAT tem uma interface gráfica e entrada de dados espaciais acoplada com o software livre QGis.

Esse modelo é o mais adequado para as bacias hidrográficas agrícolas, sendo excelente para cálculo de cargas máximas diárias, uma vez que pode simular uma grande variedade de práticas conservacionistas, tendo sido aplicado com sucesso em bacias hidrográficas de vários países (Daniel *et al.*, 2011). Ele também pode ser utilizado para lidar com riscos ambientais, pois tem a capacidade de previsão e representação de eventos extremos ligados à segurança hídrica, tais como inundações e estiagens.

Uma evolução desse modelo, o SWAT+ é uma versão completamente reestruturada do SWAT que foi desenvolvida para enfrentar os desafios presentes e futuros na modelagem e gestão de recursos hídricos e para atender às necessidades da comunidade mundial de usuários. O modelo enfatiza a conectividade de elementos espaciais dentro de uma bacia hidrográfica, tais como unidades de resposta hidrológica, aquíferos, canais e reservatórios (Armoa *et al.*, 2023) e, atualmente, tem sido utilizado por ser considerado mais flexível no que concerne à representação espacial de interações e processos dentro de uma bacia de drenagem (Bieger *et al.*, 2017).

Assim, o SWAT+ tem a capacidade de simular mudanças de cobertura e usos da terra na vazão, na carga sedimentar e no balanço hídrico (Costa *et al.*, 2023; Khorn *et al.*, 2022; Martins *et al.*, 2021; Oliveira *et al.*, 2022). A previsão de suprimento futuro de água também pode ser apoiada

pelo modelo SWAT (Luo *et al.*, 2018; Tefera *et al.*, 2023; Wu *et al.*, 2023). Cenários hídricos sob o efeito de mudanças climáticas também têm sido largamente apoiados pela ferramenta (Acharki *et al.*, 2023; Colín-García *et al.*, 2024; Oliveira *et al.*, 2019).

O processo de modelagem realizado pelo SWAT+ divide a bacia principal em sub-bacias e Unidades de Paisagem (*Landscape Units – LSUs*). As LSUs são áreas que drenam diretamente para um determinado trecho de curso hídrico. Há também a possibilidade de criação de LSUs destinadas à representação de planícies aluviais, em que os processos são representados de maneira mais específica.

Uma vez criado um cenário base, diversas conjunturas alternativas podem ser simuladas por meio do SWAT+, como o comportamento da bacia frente a alterações climáticas, mudanças na cobertura e usos da terra, implantação de práticas de manejo, adoção de práticas conservacionistas e quaisquer outras que se possa vislumbrar.

No entanto, cabe salientar que a criação de um cenário base confiável passa pela calibração do modelo, com foco em ajustar os diversos parâmetros congregados pelo SWAT+ e pela validação das simulações. Nesse sentido, Andrade *et al.* (2017) afirmam que a confiabilidade dos dados experimentais constitui elemento-chave na capacidade da modelagem hidrológica de melhor representar a realidade. Nessa perspectiva, a seleção e o tratamento dos dados entrada é uma das etapas mais importantes do processo.

No Brasil, embora exista uma disponibilidade hídrica significativa, sua distribuição é considerada irregular, tanto no tempo quanto no espaço. Isso demonstra a relevância de estudos sobre bacias hidrográficas, sobretudo por sua importância no suprimento hídrico, pois propiciam diferentes formas de uso e ocupação, nas quais se incluem zonas de cultivo, áreas urbanas, atividades industriais e agropecuárias, áreas com preservação da vegetação nativa, entre outras (Viana *et al.*, 2018).

A maioria dos estudos concentra-se em bacias de maior porte e as pequenas bacias são, muitas vezes, negligenciadas pelos gestores e pesquisadores. As pequenas bacias hidrográficas atuam como uma ponte entre a escala local e a escala regional e são importantes áreas naturais, ecológicas e sociais funcionais (Chen *et al.*, 2024). Além disso, essas áreas de drenagem concentram grande parte da população e das atividades produtivas em muitos estados da federação.

A modelagem de pequenas bacias hidrográficas pode auxiliar para demonstrar os processos atuantes, especializados e quantificados por meio da modelagem. Ademais, o monitoramento

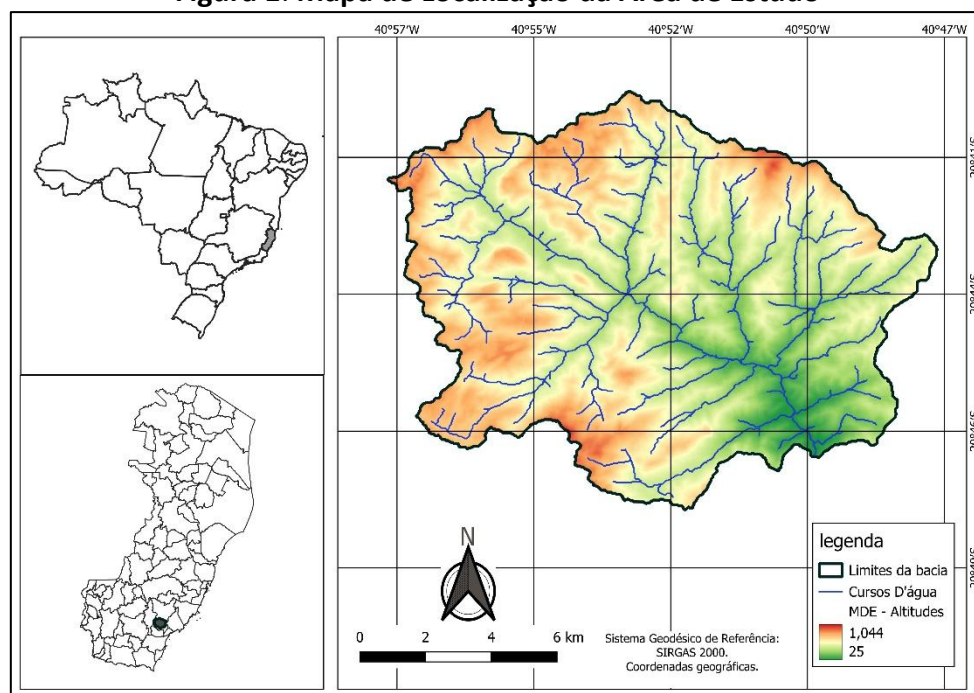
hidrológico é de suma importância para a determinação do balanço hídrico e do conhecimento das inter-relações e das agregações dos diversos processos envolvidos como evapotranspiração, infiltração, percolação, armazenamento da água no solo, escoamento subsuperficial e superficial, geração da vazão, processos de erosão, transporte e deposição dos sedimentos pelo transporte de substâncias orgânicas e inorgânicas (Pereira; Barbieiro; Quevedo, 2020).

### 3. MATERIAIS E MÉTODO

#### 3.1 Área de Estudo

A área objeto da presente pesquisa foi a bacia hidrográfica do Rio Iconha, localizada no litoral Sul do estado do Espírito Santo, região Sudeste do Brasil. A bacia está delimitada entre as latitudes 20° 40' 12" e 20° 47' 35" S e entre as longitudes 40° 47' 31" e 40° 57' 11" W, ocupando parcialmente os territórios dos municípios de Iconha e Rio Novo do Sul. A bacia a ser modelada foi delimitada a montante da estação fluviométrica (Código ANA 57320000) situada próximo à sede do município de Iconha, perfazendo uma área de 147 km<sup>2</sup>. A escolha pela delimitação parcial da bacia se deu a fim de que os valores simulados fossem calibrados para o exutório da bacia modelada, coincidindo com os dados de vazão observados. A Figura 1 mostra a localização da área de estudo e suas principais características hidrográficas e hipsométricas.

**Figura 1: Mapa de Localização da Área de Estudo**



Fonte: Elaboração própria, 2024.

A bacia se encontra na unidade de relevo classificada como Morros e Montanhas do Centro-Sul Capixaba (IBGE, 2023), que consiste numa unidade de característica estrutural formada por morros e montanhas entrecortados por rios encaixados de leitos pedregosos e encachoeirados. Estes rios apresentam canais do tipo retilíneo e padrão de drenagem dendrítico com variações para o padrão retangular. Esses vales estruturais apresentam acumulações de estreitos depósitos aluviais que coalescem com os depósitos coluviais na base da encosta, muitas vezes, apresentando depósitos de tálus.

Os topos são marcados por mantos de alteração de pouca espessura, com encostas de declividades fortes, superiores a 30°. Nos modelados prevalecem os relevos dissecados estruturais com topos aguçados, possuindo densidades de drenagem média a muito fina e aprofundamentos médios a forte (IBGE, 2023). A amplitude altimétrica da bacia é bastante acentuada, considerada sua extensão, e varia de 25 m em seu exutório a 1044 m nos topos mais altos.

O clima predominante na bacia pode ser caracterizado, de acordo com a classificação de Koppen, como tropical de inverno seco – Aw (Alvares *et al.*, 2013) e temperaturas médias em torno dos 18° C. O solo predominante na bacia é o Cambissolo Háplico (Figura 2) com associações de Latossolo Amarelo Distrófico e afloramentos rochosos (Cunha *et al.*, 2016).

### 3.2 Dados de entrada

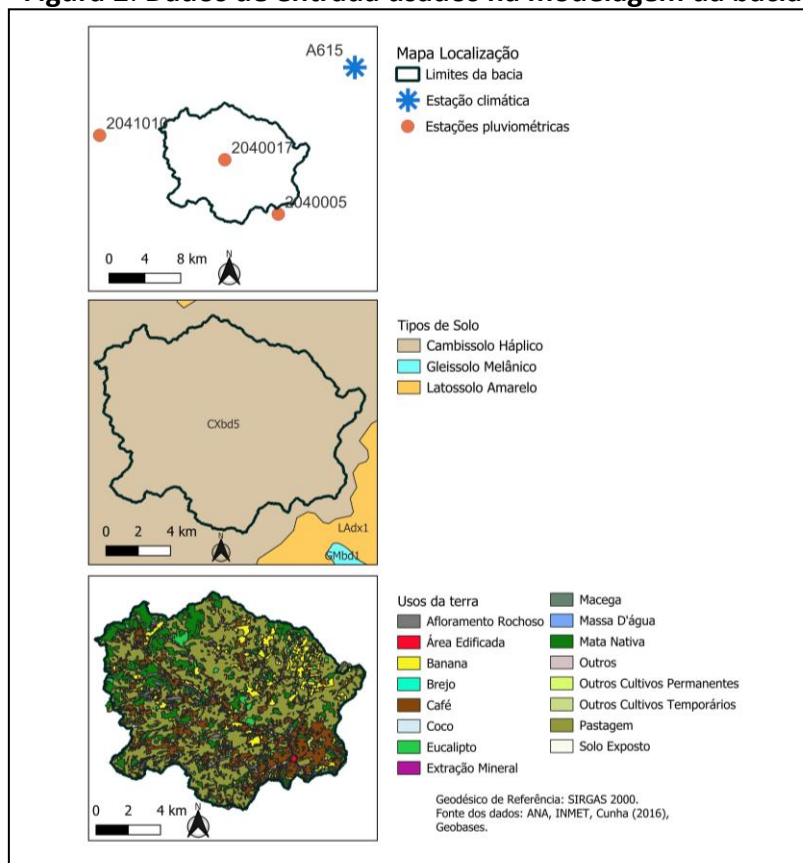
Para execução da modelagem foi necessária a aquisição de diversos dados espaciais referentes às características físicas da bacia e optou-se por dados de acesso livre adquiridos de fontes diversas. O mapa de cobertura e usos da terra foi adquirido conforme classificação por aerofotogrametria realizada pelo Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IEMA, 2015) compatível com a escala 1:25.000. O mapa de solos utilizado foi elaborado por Cunha *et al.* (2016) para compatibilidade com a escala 1:250.000. Além disso, foi utilizado o MDE (Modelo Digital de Elevação) FABDEM V1-0 – *Forest and Buildings removed Copernicus DEM* (Hawker; Neal, 2021) para delimitação da bacia e dos cursos d'água, a partir das rotinas disponibilizadas pelo modelo hidrológico utilizado. Os dados adquiridos originalmente em formato vetorial (solos e cobertura e usos da terra) foram convertidos para o formato matricial com resolução espacial de 30 m para corresponder à resolução do MDE.

Além dos dados espaciais, foram utilizados também dados sobre as características do solo, coletados em campo e processados em laboratório. As séries de dados climáticos e fluviométricos



foram adquiridas junto ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e ao Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), compreendendo o período de 2007 a 2016. A Figura 2 mostra a localização das estações utilizadas na pesquisa e os dados de entrada espaciais utilizados.

**Figura 2: Dados de entrada usados na modelagem da bacia**



Fonte: Elaboração própria, 2024.

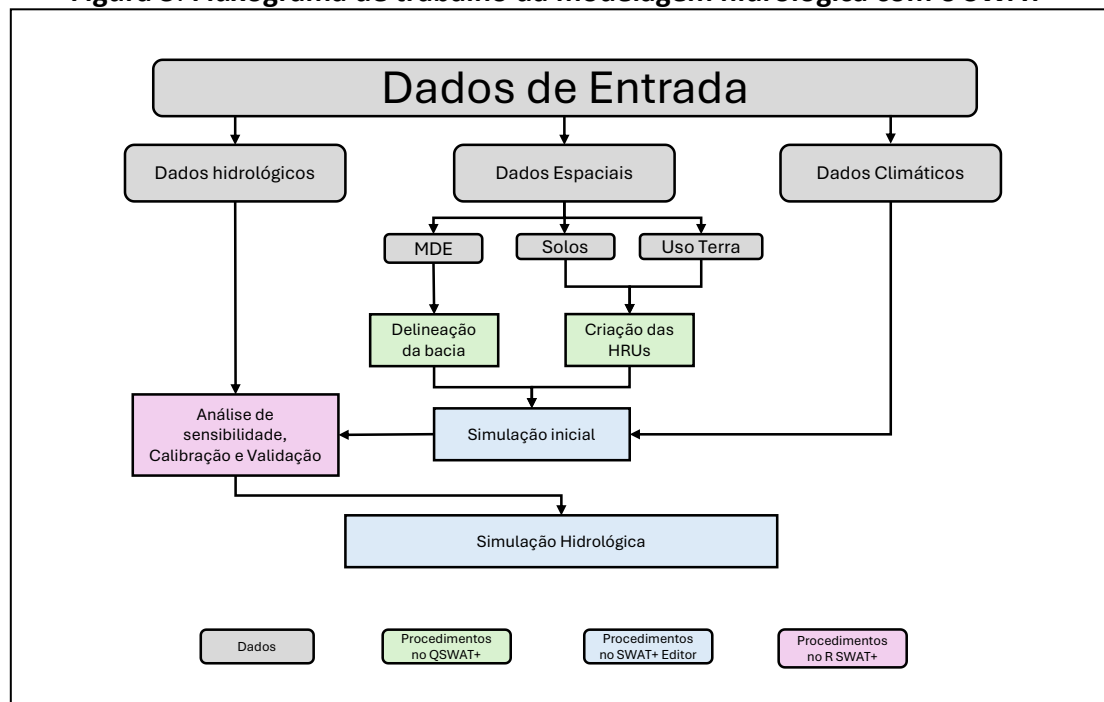
### 3.3 Modelagem Hidrológica

A modelagem hidrológica foi realizada conforme o esquema mostrado na Figura 3, utilizando os softwares QGIS 3.34 e o plugin QSWAT+ 2.4.7 para entrada dos dados espaciais e delimitação da bacia, o SWAT+ Editor 2.3.3 para configuração dos parâmetros de entrada dos dados climáticos e o processo de calibração foi realizado com o RStudio 4.3.0 e pacote RSWAT 3.0, todos de acesso livre.

O procedimento de modelagem hidrológica requer algumas configurações básicas, como definição das classes de declividade que serão utilizadas para criação das Unidades de Resposta Hidrológicas (HRUs) utilizadas pela modelagem e definição do período de simulação e aquecimento do modelo. As classes de declividade foram definidas baseando-se na sugestão da Empresa

Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 1979) (0-8%, 8-20%, 20-45%, 45-75% e >75%) e unindo as duas menores faixas, haja vista baixa presença de relevos planos em ambas as bacias. Para a execução do modelo, foi utilizado o período de 01/01/2004 a 31/12/2016, considerando três anos de aquecimento.

**Figura 3: Fluxograma de trabalho da modelagem hidrológica com o SWAT+**



Fonte: Elaboração própria, 2024.

### 3.4 Calibração e Validação do Modelo

A calibração consiste em procedimentos de adequação e verificação da eficiência de um modelo de uma bacia hidrográfica, cujos parâmetros são ajustados a partir da comparação com dados medidos em campo. A validação se resume em executar o modelo com os valores de parâmetros determinados na calibração como os mais adaptados a representar a variável de interesse (no caso, a vazão) para verificar se os ajustes respondem bem a outro período (Brighenti; Bonumá; Chaffe, 2016).

Para realização da calibração, foi utilizado o período entre 2007 e 2014 e, para validação, o modelo foi testado nos anos de 2015 e 2016. A verificação da adequação das simulações realizadas com o modelo à bacia é feita por meio da comparação dos valores simulados com os observados e baseada em índices de eficiência. Os índices mais utilizados para avaliação de modelagens hidrológicas são o Coeficiente de determinação ( $R^2$ ), o Coeficiente de eficiência do modelo de Nash-



Sutcliffe (NSE), a Raiz do Erro quadrático médio (RSR) e o Percentual de Viés (PBias). A classificação da qualidade da simulação realizada e as faixas de valor correspondentes são mostradas na Tabela 1. O procedimento de calibração foi antecedido pela análise de sensibilidade para definição dos parâmetros mais representativos na bacia. Após essa definição, os parâmetros foram definidos e os valores configurados, conforme mostrado na Tabela 2.

**Tabela 1: Índices de performance de modelagens hidrológicas**

<b>Classificação</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>NSE</b>	<b>RSR</b>	<b>Pbias</b>
Muito Bom	> 0.8	> 0.75	< 0.5	<  10
Bom	0.7 a 0.8	0.65 a 0.75	0.5 a 0.6	10  a  15
Satisfatório	0.5 a 0.7	0.5 a 0.65	0.6 a 0.7	15  a  25
Insatisfatório	< 0.5	< 0.5	> 0.7	>  25

Fonte: Leta *et al.* (2023).

**Tabela 2: Parâmetros e valores de calibração configurados**

<b>Parâmetro</b>	<b>Significado</b>	<b>Grupo Calibração</b>	<b>Tipo de mudança</b>	<b>Valor atribuído</b>
CN2	Número de Curva SCS	HRU	Porcentagem	-2.1%
LAT_TTIME	Tempo de viagem do fluxo lateral	HRU	Valor definido	0.655
ESCO	Fator de compensação da evaporação do solo	HRU	Valor definido	0.836
EPCO	Fator de compensação de absorção pela planta	HRU	Valor definido	0.1
CN3_SWF	Fator de água do solo para SCS CN3	HRU	Valor definido	0.6
PERCO	Coeficiente de Percolação	HRU	Valor definido	0.7
SURLAG	Coeficiente de atraso do escoamento superficial	BAS	Valor definido	0.571
ALPHA	Fator alfa para curva de recessão das águas subterrâneas	AQU	Valor definido	0.154
REVAP_CO	Coeficiente de “revap” das águas subterrâneas	AQU	Valor definido	0.033
FLO_MIN	Profundidade limite da superfície ao lençol freático para que ocorra o fluxo de água subterrânea	AQU	Valor definido	18.557
REVAP_MIN	Profundidade limite da água no aquífero raso para que o “revap” ocorra	AQU	Valor definido	26.868
AWC	Umidade do solo disponível para a planta	SOL	Valor definido	0.011

Fonte: Elaboração própria, 2024.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Performance do Modelo

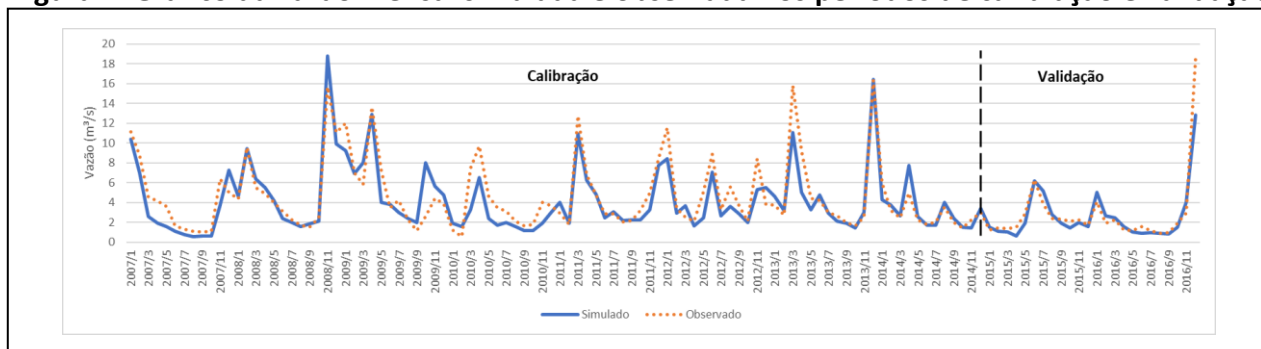
Após o ajuste dos parâmetros, a performance do modelo foi avaliada por meio da comparação das simulações de vazão diárias e mensais com os dados observados. A partir dessa comparação, foram calculados os índices de performance, que resultaram nos valores apresentados na Tabela 3. Os gráficos comparando os valores simulados com os observados podem ser vistos na Figura 4.

**Tabela 3: Índices de performance obtidos**

Índices avaliados	Simulação Mensal				Simulação Diária			
	Calibração		Validação		Calibração		Validação	
	Valor	Classificação	Valor	Classificação	Valor	Classificação	Valor	Classificação
R <sup>2</sup>	0.81	Muito Bom	0.91	Muito Bom	0.62	Satisfatório	0.57	Satisfatório
NSE	0.79	Muito Bom	0.86	Muito Bom	0.59	Satisfatório	0.56	Satisfatório
Pbias	10.26	Bom	9.86	Muito Bom	5.77	Muito Bom	-0.21	Muito Bom
RSR	0.45	Muito Bom	0.38	Muito Bom	0.64	Satisfatório	0.67	Satisfatório

Fonte: Elaboração própria, 2024.

**Figura 4: Gráfico da vazão mensal simulada e observada nos períodos de calibração e validação**



Fonte: Elaboração própria, 2024.

Como se observa na tabela, todos os índices avaliados foram considerados bons ou muito bons para a simulação mensal, o que também pode ser verificado pelo bom ajuste entre as vazões observadas e simuladas. Para a vazão diária, a maior parte dos índices foi considerada satisfatória. A obtenção desses índices, no entanto, exigiu uma análise de consistência e o tratamento dos dados observados que serão mostrados a frente, haja vista a presença de falhas e inconsistências nas séries históricas disponíveis.

## 4.2 Desafios e soluções para modelagem da bacia hidrográfica do rio Iconha

A realização de uma modelagem que representasse satisfatoriamente tanto os processos hidrológicos no passo mensal e diário encontrou uma série de desafios, o que levou à busca de soluções para que o modelo pudesse servir às finalidades que se destina. Esses desafios e as soluções podem variar conforme as fontes de dados disponíveis para cada bacia que se pretenda modelar e alguns desses potenciais desafios e as alternativas encontradas serão mostrados nos próximos parágrafos.

### 4.2.1 Dados espaciais de entrada

Embora a aquisição de dados espaciais para entrada no modelo seja relativamente simples, a disponibilidade de diferentes fontes faz com que seja necessária a avaliação de quais dados têm maior potencial para representação das condições da bacia.

Iniciando pelo MDE, as diferentes fontes e resoluções espaciais fazem com que o modelador precise fazer a escolha mais adequada, equilibrando a performance do modelo em termos de qualidade com a exigência computacional disponível para processamento dos dados. Para a área de estudo, por exemplo, foram identificados seis MDEs, cujas resoluções espaciais variam entre 2 e 90 m. Uma avaliação de MDEs para modelagem hidrológica com o SWAT+ foi realizada por Campos *et al.* (2023b), que concluíram não haver vantagens significativas na utilização de MDEs com resoluções espaciais mais finas que 30 m para modelagem de bacias dessa extensão. As avaliações realizadas para esta bacia levaram à escolha do MDE FABDEM, com 30 metros de resolução espacial.

Tratando-se dos dados de cobertura e usos da terra, uma das opções é que o modelador faça sua própria classificação de imagens orbitais. Porém, havendo a existência de dados confiáveis e correspondentes com o período que se deseja trabalhar, a opção por utilizá-los pode minimizar o risco de erros classificação/interpretação de imagens e reduzir o tempo de preparação dos dados. Para a bacia em questão, foram avaliados os mapas de cobertura e usos da terra do IEMA (2015) e da plataforma MapBiomas, optando-se pelo primeiro devido ao maior detalhamento dos usos e à melhor performance em relação aos índices de avaliação do modelo antes da calibração.

Para representação das características físicas e agronômicas dos diferentes usos da terra, o SWAT+ conta com um banco de dados onde diversas culturas são disponibilizadas. Em alguns casos, no entanto, alguns dos usos da terra existentes na bacia podem não encontrar correspondência no banco disponível. Neste caso, o modelador precisa optar por substituir o uso por algum dos usos

disponíveis no banco de dados que tenha características similares ou produzir/coletar todos os dados do uso, o que pode ser um trabalho que leva mais tempo que a própria modelagem. Para o caso da bacia em questão, por exemplo, o mapa do IEMA (2015) indicava a presença de afloramentos rochosos, para os quais não há correspondência no banco de dados. A solução encontrada foi atribuir a essas áreas o uso classificado como de estrutura de transporte/asfalto (código utr) haja vista as características similares de impermeabilização e comportamento do escoamento superficial.

O mapa de tipos de solo é outro dado espacial exigido para execução do modelo. Neste caso, um desafio para pequenas bacias é a existência de mapas em escala adequada para representação da diversidade pedológica da bacia. O mapa de melhor resolução disponível para a área de estudo tem a escala de trabalho de 1:250.000, que classificava toda a área da bacia dentro de um mesmo polígono. A própria classificação indica que, além do solo predominante, existem pelo menos mais duas associações. Visitas de campo identificaram ainda a presença de um quarto tipo de solo.

Além do desafio da delimitação pedológica existe ainda a necessidade da inserção de dados acerca de cada tipo de solo presente na bacia. O SWAT+ também conta com um banco de dados de solos, no entanto essas informações não estão disponíveis ou correlacionadas com os solos existentes em grande parte do território brasileiro. Neste caso, a solução encontrada foi a aquisição de dados através do Sistema de Informação de Solos Brasileiros (SOLOS) da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) e o cálculo dos índices necessários para entrada no modelo por meio de equações de pedotransferência.

Este banco de dados fornecia três diferentes amostras para o polígono que continha os solos da bacia e uma comparação desses diferentes dados foi realizada por Delmaschio *et al.* (2022). Porém, diante da inexistência de amostras de dentro da bacia, para o projeto em questão optou-se pela realização de um trabalho de campo para coleta de amostras representativas do solo local, que foram seguidas pelo processamento dessas amostras em laboratório para obtenção dos valores de parâmetros necessários.

#### 4.2.2 Série de dados observados

A existência de séries de dados observados por estações fluviométricas, hidrossedimentológicas, climáticas e pluviométricas é de grande importância para a criação de um cenário base para o modelo, nos quais os processos existentes na bacia sejam bem representados.

Esses dados são utilizados para fornecer os *inputs* do modelo (dados climáticos) e avaliar os *outputs* (valores de vazão e carga de sedimentos), assim como para calibrar adequadamente os parâmetros do modelo.

O primeiro desafio encontrado na modelagem de pequenas bacias é a existência de dados fluviométricos em quantidade e qualidade suficientes para calibração do modelo. No caso em questão, a área de estudo foi escolhida especialmente pela existência de uma estação com uma série de dados razoavelmente longa. Porém, isso não impediu que desafios fossem encontrados durante a modelagem da bacia.

Para o período utilizado para a calibração (2007 a 2014), das 2922 observações diárias esperadas foram encontradas 154 falhas e 12 valores inconscientes (correspondente a 2,3% do total). Além disso, as características e o comportamento hidrológico da bacia se mostraram incompatíveis com o tipo de estação utilizada para medição das vazões.

A medição da vazão na bacia é feita por estação fluviométrica convencional, com medidas feitas por meio da leitura de régua linimétrica duas vezes ao dia e correspondência dessas observações com a curva-chave. Por este método, se no momento de uma das leituras o nível do rio estiver muito acima de sua marca no restante do dia, a extrapolação realizada tende a falsear a vazão diária para valores exageradamente altos. Similarmente, a ocorrência de cheia e vazante em intervalos fora dos horários de leitura (que são muito comuns na bacia), pode fazer com que toda a vazão adicional não seja capturada pelo método.

Devido às características da bacia, a alteração do nível d'água ocorre, muitas vezes, em minutos, conforme se pode observar nos registros da defesa civil local (Figura 5) em que, num período de menos de seis horas, o nível da água teve uma variação considerável. Dado os horários em que a pequena cheia ocorreu, o valor da vazão medida nesse dia, por exemplo, certamente não incorporou o evento mostrado.

A bacia do Rio Iconha é acometida com a ocorrência de chuvas orográficas intensas e possui áreas de vulnerabilidade à inundação (Pontini; Coelho, 2022). As dificuldades para monitoramento dessa vulnerabilidade já foram relatadas por Campos *et al.* (2023a) e demonstraram a dificuldade de se representar os eventos de enchente por meio da modelagem hidrológica, haja vista a sua ocorrência em intervalo subdiário e da forma como os dados são coletados pelas estações pluviométricas existentes no entorno da bacia. Silva e Coelho (2022), ao analisar as enchentes na bacia perceberam a falta de correspondência entre os episódios de inundação na sede do município

e os registros de vazão diária no banco de dados do Hidroweb/ANA e não encontraram uma correlação satisfatória entre as vazões e os totais pluviométricos registrados.

**Figura 5: Publicações da defesa Civil de Iconha no Instagram alertando sobre a variação do nível do Rio em período inferior a 6 horas**



Fonte: Instagram da Defesa Civil Municipal de Iconha, 2024.

Para uma bacia com eventos subdiários, como a do estudo em questão, os instrumentos existentes para monitoramento fluviométrico e pluviométrico não são capazes de registrar adequadamente toda a complexidade existente. Essas incongruências em alguns casos eram bastante evidentes e impuseram uma dificuldade adicional na calibração do modelo, o que forçou a exclusão de 26 observações fluviométricas para realização do procedimento.

Outro desafio encontrado diz respeito à inexistência de uma estação meteorológica na bacia estudada, uma vez que dados de temperatura, umidade do ar, vento e radiação solar são exigidos pelo modelo. As possíveis formas de contornar essa carência são a utilização de dados de reanálise ou da estação mais próxima, mesmo que localizada fora da bacia. Para o caso em estudo, uma avaliação realizada por Tonani *et al.* (2022) demonstrou que o modelo performou melhor com os dados observados de uma estação próxima, que acabou sendo a opção escolhida nesta pesquisa.

#### 4.3 Potencialidades do uso da modelagem hidrológica com SWAT+ na bacia hidrográfica do rio Iconha

As modelagens hidrológicas têm uma gama de utilidades no que diz respeito à gestão de águas e são consideradas uma ferramenta importante e necessária para a gestão dos recursos hídricos e ambientais (Devia; Ganasri; Dwarakish, 2015). O SWAT, em especial, tem sido amplamente utilizado em todo o mundo e para representação de bacias dos mais diferentes

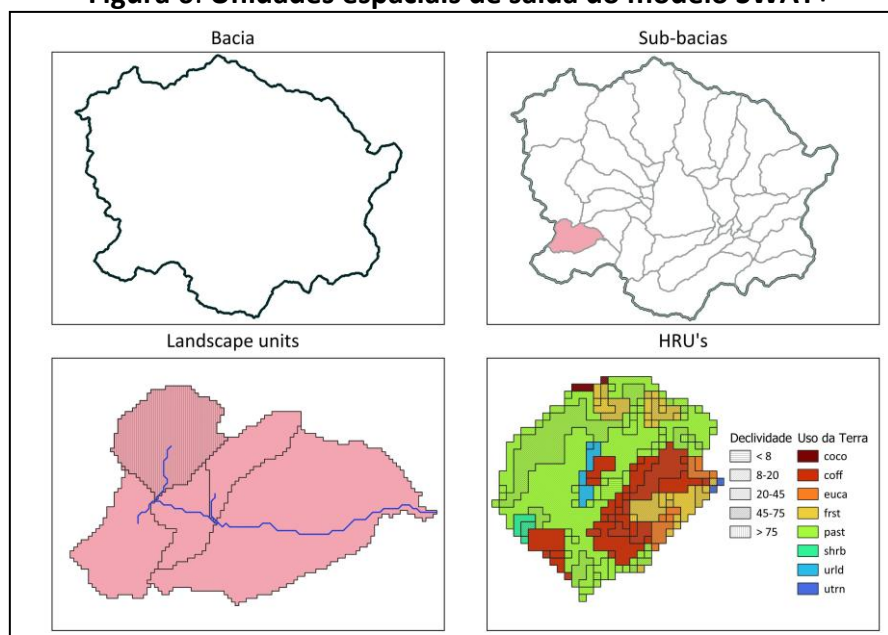


tamanhos. A grande vantagem da utilização de um modelo é que se pode prever qual será (ou qual seria) o comportamento da bacia quando sujeita a alguma condição diferente da já observada. Esses diferentes cenários auxiliam pesquisadores e gestores na tomada de decisões sobre uma infinidade de questões ligadas à gestão e ao planejamento do território.

Além das aplicações na pesquisa científica, as modelagens hidrológicas podem ser um forte elemento de apoio para agências de águas e comitês de bacia hidrográfica na implementação dos diversos instrumentos da Política Nacional de Recursos Hídricos – PNRH (BRASIL, 1997). A capacidade do modelo SWAT+ em fornecer saídas para diferentes unidades espaciais e para diferentes variáveis comprova sua versatilidade na configuração de cenários demonstrando sua potencialidade.

O modelo SWAT+ pode gerar resultados espacialmente distribuídos em quatro escalas diferentes: Bacia, Sub-bacias, Landscape Units e HRUs. A Figura 6 demonstra o detalhamento dessas unidades espaciais na bacia do Rio Iconha.

**Figura 6: Unidades espaciais de saída do modelo SWAT+**



Fonte: Elaboração própria, 2024.

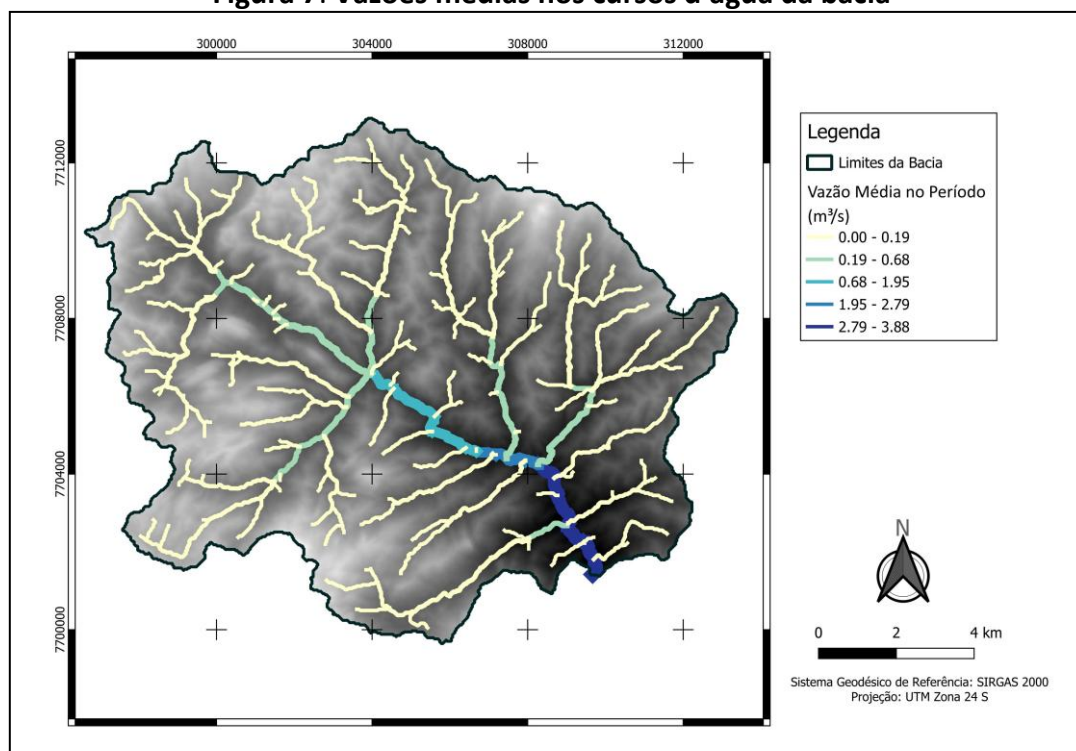
#### 4.3.1 Visualização de resultados do cenário base

Como visto no tópico anterior, a possibilidade de visualização de resultados pelo modelo SWAT+ é bastante ampla, porém, para fins de apresentação neste trabalho, serão mostrados por cursos d'água e unidades de paisagem (*Landscape Units – LSUs*).

O monitoramento fluviométrico de pequenos cursos d'água é realizado com uma frequência muito baixa e espacialização parca no Brasil, o que obriga os gestores a adotarem alguns métodos como a regionalização de vazões para estimar o comportamento dos pequenos riachos, como também criarem uma base de dados para importantes instrumentos como a outorga do direito de uso dos recursos hídricos, por exemplo. O modelo SWAT+, a partir da entrada dos dados climáticos e das características físicas da bacia, gera resultados para cada um dos cursos d'água mapeados, o que pode possibilitar uma gestão mais detalhada e melhor espacializada de cada uma das variáveis do curso hídrico.

A principal variável simulada pelo modelo é a vazão que, neste trabalho, foi realizada para os passos de tempo diário, mensal e anual. A simulação também pode ser subdiária, no entanto, a não foi realizada, pois não existem dados de precipitação subdiários para a bacia. A média das vazões simuladas para o período de cada curso d'água é mostrada na Figura 7 e permite observar como o caudal dos corpos hídricos aumenta das cabeceiras em direção ao exutório da bacia.

**Figura 7: Vazões médias nos cursos d'água da bacia**

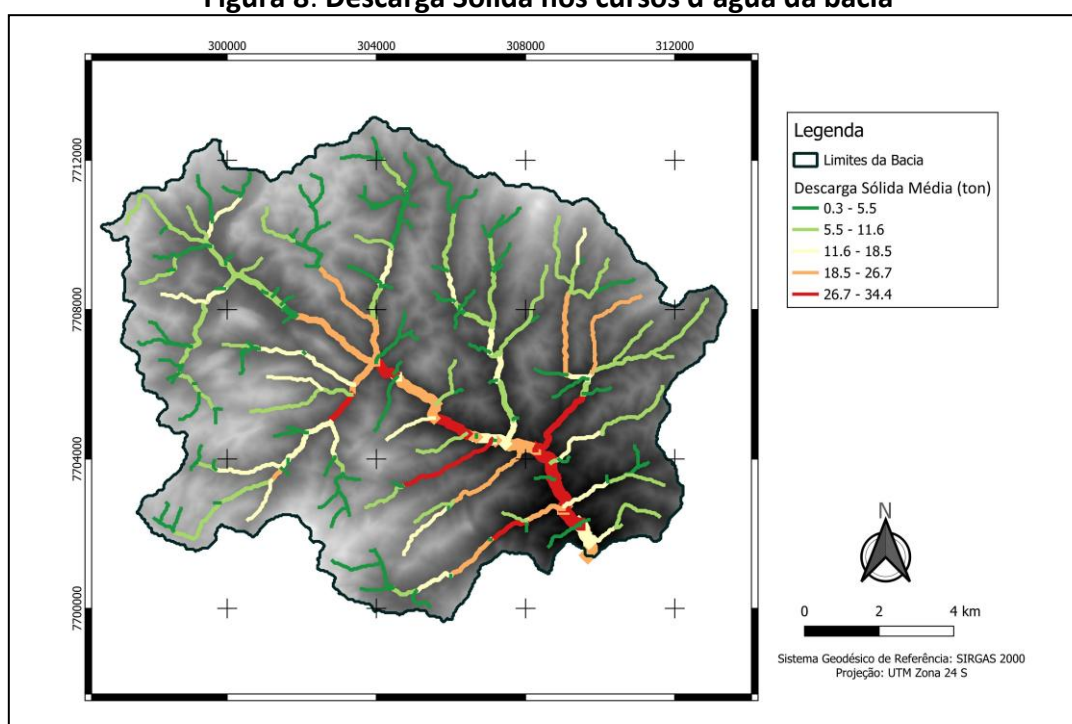


Fonte: Elaboração própria, 2024.

Outras variáveis relacionadas com a vazão dos cursos hídricos também podem ser simuladas e demonstradas pelo modelo. Este tem a capacidade de simular a dinâmica de sedimentos de

maneira ainda mais detalhada, projetando as proporções de areia, silte, argila e cascalho transportados e depositados no leito dos rios. Há, ainda, simulação da carga de nutrientes e pesticidas nos cursos d'água, ou seja, o modelo tem a capacidade de calcular as variações de qualidade da água ao longo do tempo e ao longo da bacia. A descarga sólida média (em toneladas de sedimentos), por exemplo, é mostrada na Figura 8 para cada um dos trechos hídricos da bacia e permite identificar onde os aportes de sedimentos são mais proeminentes, o que está associado ao relevo e a cada cobertura e usos da terra encontrados em cada porção da bacia.

**Figura 8: Descarga Sólida nos cursos d'água da bacia**



Fonte: Elaboração própria, 2024.

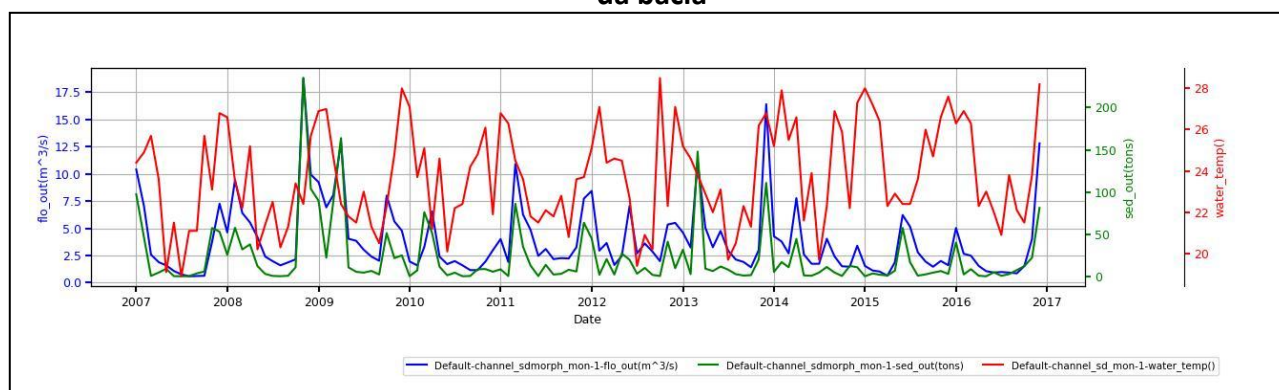
Quanto mais detalhadas as informações que se deseja extrair, mais detalhados devem ser os dados de entrada e o monitoramento para que a calibração seja feita com precisão. Por esse motivo, no caso em questão, as avaliações de qualidade de água não foram realizadas.

Embora o mapa mostre a descarga média, o modelo fornece os valores de diversas variáveis para cada passo temporal simulado. A título de exemplo desse potencial, a Figura 9 mostra a variação mensal da vazão, da descarga de sedimentos e da temperatura média da água durante o período da simulação.

Além dos resultados referentes aos cursos d'água, o modelo também apresenta algumas variáveis espacialmente. Em relação ao balanço hídrico, o modelo é capaz de calcular por cada

unidade espacial os valores de variáveis como precipitação, escoamento superficial e evapotranspiração ocorridos para cada período escolhido. As Figuras 10, 11 e 12 mostram o cálculo médio dessas variáveis para as unidades da paisagem existentes na bacia.

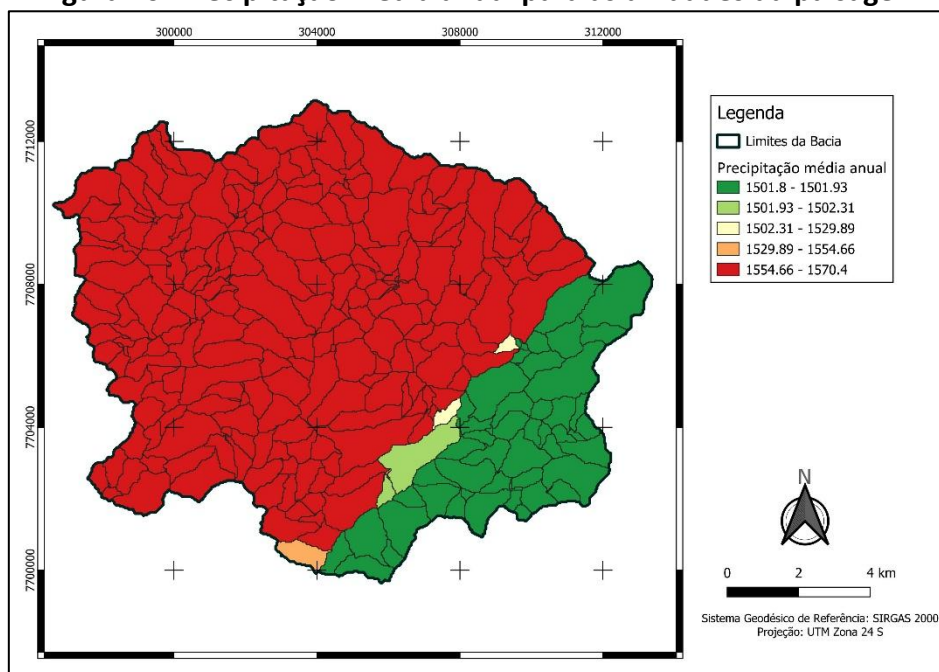
**Figura 9: Variação mensal da vazão, descarga de sedimentos e temperatura da água no exutório da bacia**



Fonte: Elaboração própria, 2024.

Isso permite a realização de comparações tanto espaciais (entre os diferentes compartimentos da bacia) como temporais (entre os diferentes períodos da simulação realizada). Assim, podem-se usar as diferenças observadas para definir estratégias e ações a serem adotadas na gestão da bacia em termos de priorização de áreas e períodos para realização de intervenções.

**Figura 10: Precipitação Média anual para as unidades da paisagem**



Fonte: Elaboração própria, 2024.

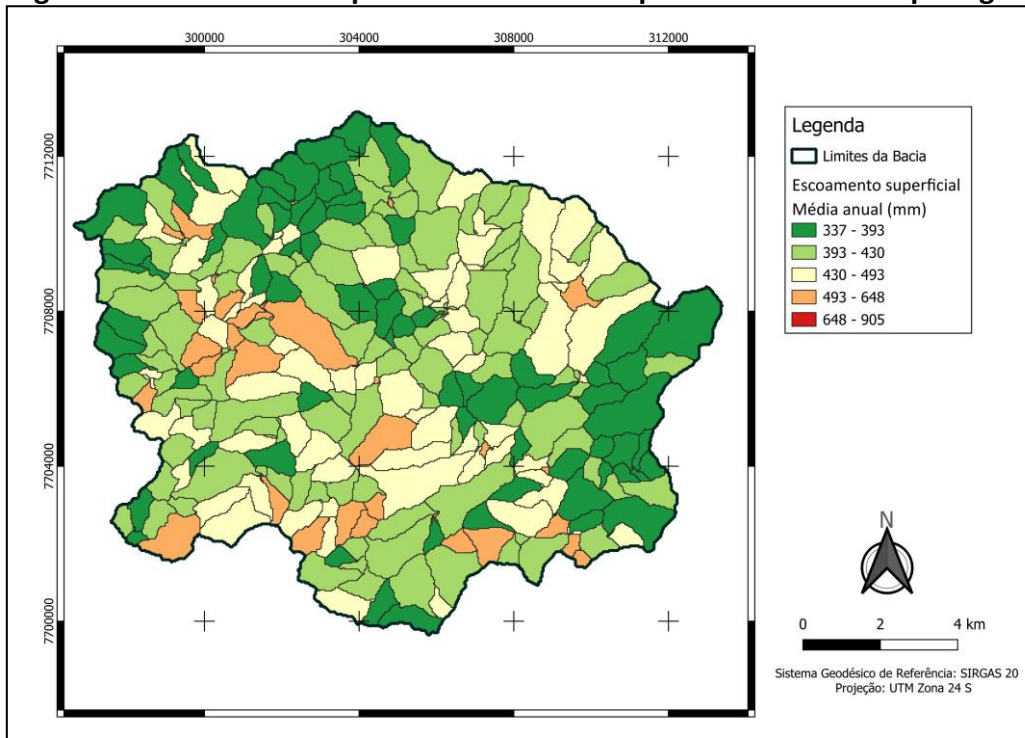
Para espacialização das precipitações, o modelo utiliza a altura pluviométrica da estação mais próxima de cada HRU, assim, como pode ser visto na Figura 10, a maior parte das LSUs assumiu valores próximos por estarem localizados no entorno da estação pluviométrica localizada no centro da bacia (2040017).

A espacialização de outras variáveis, no entanto, é obtida por meio de complexas equações que combinam as características de relevo, cobertura e usos da terra e tipo de solo. Assim, como pode ser observado na Figura 11, o escoamento superficial varia de maneira não padronizada espacialmente, mas guardando uma estreita relação com a cobertura e usos da terra e a declividade existentes em cada LSU. Da mesma maneira, a Figura 12 (que retrata a evapotranspiração média) é influenciada, principalmente, pelas características da vegetação existente nas unidades de paisagem.

A produção de água e sedimentos na bacia também é uma variável simulada pelo modelo, que pode ser muito útil no entendimento dos processos atuantes e na elaboração de estratégias de gestão. A Figura 13 mostra a distribuição espacial da produção de água, que se trata da quantidade de água precipitada que chega aos corpos hídricos da bacia. A disposição dessa variável está correlacionada com vários fatores simultaneamente. A predição espacial e a visualização desses valores pelo SWAT+ auxilia fortemente a identificação das áreas que contribuem com maiores volumes de água e, conseqüentemente, auxiliam o planejamento de ações na bacia.

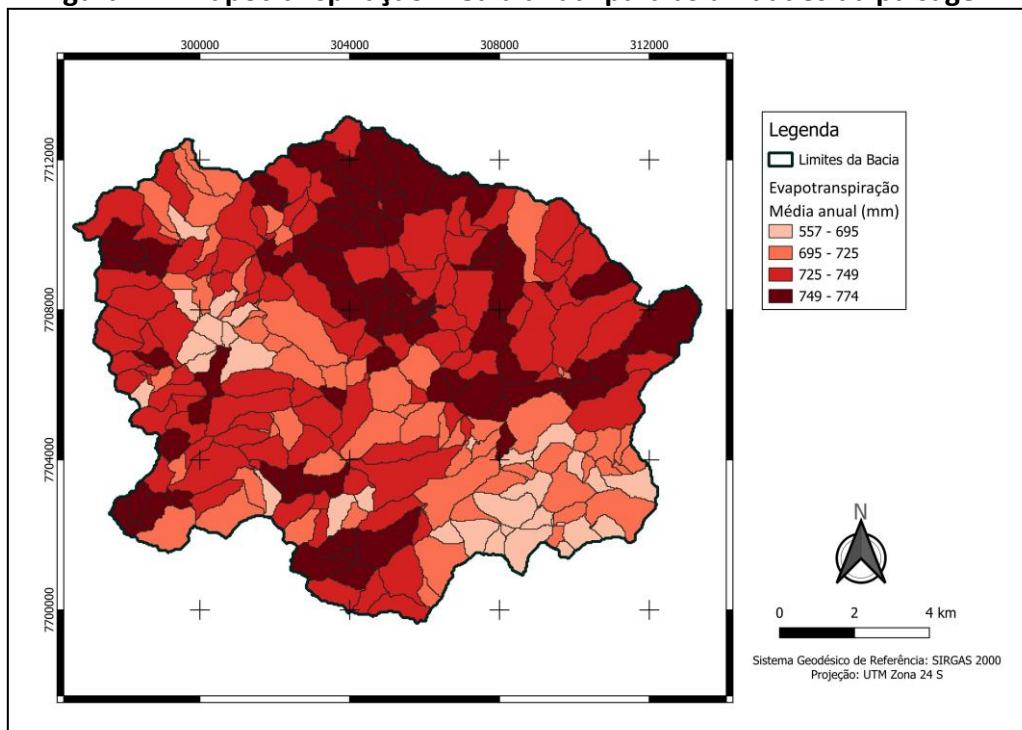


**Figura 11: Escoamento Superficial médio anual para as unidades da paisagem**



Fonte: Elaboração própria, 2024.

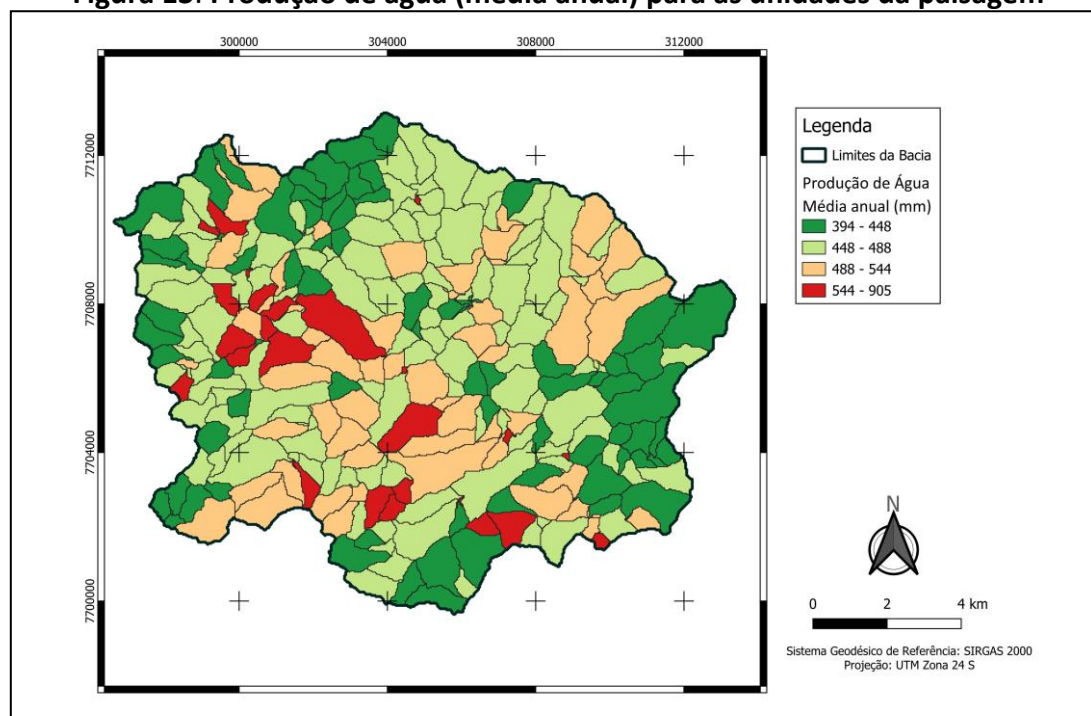
**Figura 12: Evapotranspiração média anual para as unidades da paisagem**



Fonte: Elaboração própria, 2024.



**Figura 13: Produção de água (média anual) para as unidades da paisagem**

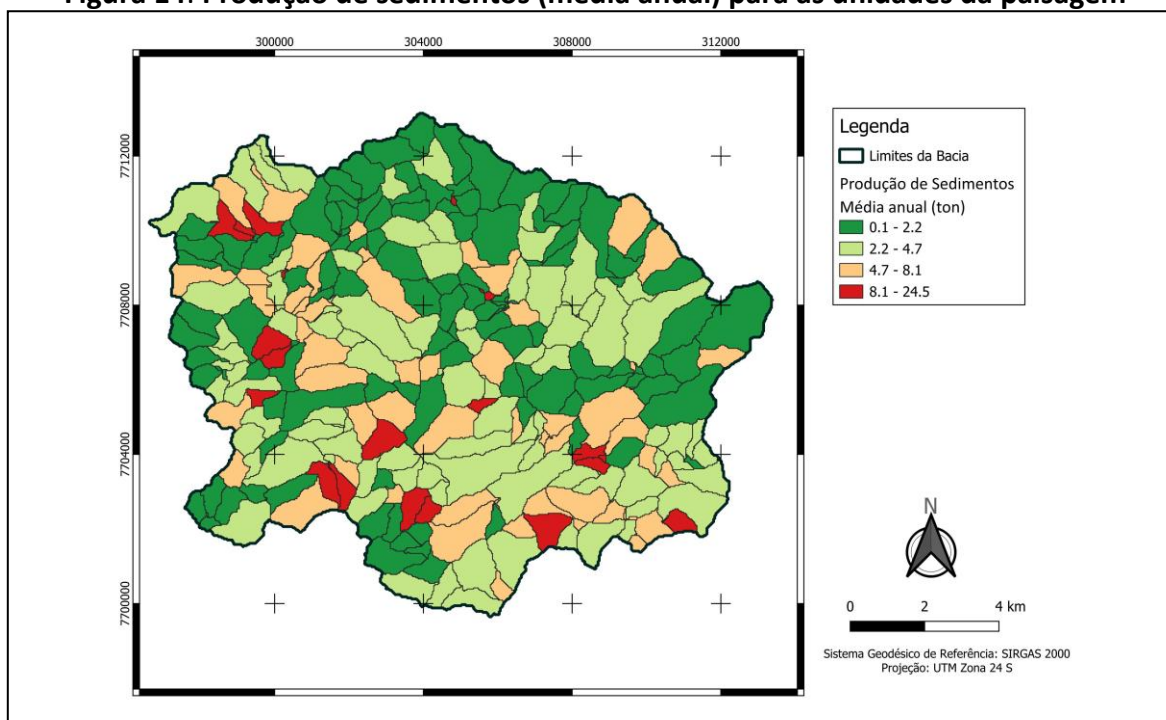


Fonte: Elaboração própria, 2024.

Outra informação relevante para o planejamento hídrico e ambiental, que pode ser verificada na Figura 14, trata-se da produção de sedimentos por unidade da paisagem (LSU). Como, no caso em questão, o tipo de solo é o mesmo para toda a extensão da bacia, podem-se observar que os valores de produção de sedimentos serão fortemente relacionados com as coberturas e usos da terra predominantes e pela declividade das unidades. Os padrões de variação dos valores são mais bem definidos e quantificados nas HRUs, uma vez que as LSUs representam a somatória das diferentes HRUs nela contidas.

A maioria dessas variáveis mostradas espacialmente estão diretamente relacionadas com as características físicas utilizadas no modelo (declividade, tipo de solo e cobertura e usos da terra) e da interação entre elas. Além de facilitar a visualização dos efeitos da interação das características, o modelo também auxilia na compreensão dos efeitos sinérgicos nas diversas variáveis de saída, pois simula a propagação da vazão e dos demais elementos transportados pela água, tanto na fase terrestre como na fase aquática do ciclo hidrológico.

**Figura 14: Produção de sedimentos (média anual) para as unidades da paisagem**



Fonte: Elaboração própria, 2024.

Há de se considerar ainda que os resultados aqui apresentados tratam unicamente do cenário base, ou seja, que representa o comportamento hidrológico da bacia em seu estado atual de uso e gestão da terra e dos recursos hídricos.

Esses resultados podem ser usados para indicar as medidas futuras de gestão mais apropriadas, por meio da comparação com possíveis cenários de alteração da cobertura e usos da terra e aplicação de medidas conservacionistas de diferentes impactos na bacia. O uso do modelo pode ainda auxiliar as agências de águas a coordenarem as ações de outorga e cobrança, subsidiar a elaboração/atualização planos de recursos hídricos, fornecer dados para os sistemas de informações e criar cenários para atendimento do enquadramento de corpos d'água.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa demonstrou, por meio de um estudo de caso, os principais desafios e potencialidades da utilização do modelo SWAT+ para gestão de recursos hídricos em pequenas bacias hidrográficas. A carência de dados espaciais de entrada em escala adequada e de dados de monitoramento consistentes foram os maiores obstáculos para o uso da ferramenta. O processo de pesquisa mostrou também que a existência de profissionais que tenham experiência com a

utilização do modelo pode ser um gargalo para a difusão de seu uso mais amplo, o que, ao mesmo tempo, aponta uma promissora área de atuação para os geógrafos e outros profissionais da área de recursos hídricos.

As soluções adotadas foram suficientes para realização de uma modelagem hidrológica satisfatória, que configura o primeiro passo para que o modelo possa servir como instrumento efetivo de apoio à gestão hídrica e ambiental. O conhecimento geográfico e hidrológico da bacia e as campanhas de campo foram fundamentais na realização das aproximações necessárias para a adoção das soluções adequadas à modelagem da bacia.

A versatilidade do modelo para representação de cenários alternativos e previsão de seu impacto na disponibilidade hídrica e nos diversos processos hidrossedimentológicos são um dos pontos mais positivos do SWAT (e sua versão SWAT+), o que contribui para que o modelo seja um dos mais usados no mundo para pesquisas científicas e geração de soluções em recursos hídricos.

Embora o modelo represente de maneira bastante verossímil o comportamento dos sedimentos na bacia e isso possa auxiliar fortemente a previsão de cenários alternativos, algumas limitações do processo precisam ser observadas. Os valores de saída apresentados para a carga sedimentar, assim como para nutrientes e pesticidas, precisam ser utilizados com parcimônia, haja vista que a inexistência do monitoramento de sedimentos na bacia impossibilitou que os valores simulados fossem confrontados com a realidade. Apesar dessa limitação, o cenário base criado está apto a apoiar a gestão das principais questões existentes na área de estudo.

Pesquisas que abordem a temática da modelagem hidrológica em pequenas bacias podem se utilizar das soluções ora propostas e abordar outros temas que auxiliem o desenvolvimento desse processo. Alguns exemplos de estudos futuros úteis para avançar nesse campo são a sistematização e disponibilização de dados de entrada para o modelo SWAT+, a comparação da performance do modelo frente à diferentes escalas de mapeamento de solos, a checagem das correspondências entre os valores simulados pelo modelo com as técnicas de regionalização de vazão usados pelas agências de águas.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo – FAPES pelo apoio à pesquisa e às instituições pela participação de seus quadros na pesquisa.

## REFERÊNCIAS

- ACHARKI, S. *et al.* Hydrological modeling of spatial and temporal variations in streamflow due to multiple climate change scenarios in northwestern Morocco. **Climate Services**, Amsterdã, v. 30, abr. 2023. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/370844845\\_Hydrological\\_modeling\\_of\\_spatial\\_and\\_temporal\\_variations\\_in\\_streamflow\\_due\\_to\\_multiple\\_climate\\_change\\_scenarios\\_in\\_northwestern\\_Morocco](https://www.researchgate.net/publication/370844845_Hydrological_modeling_of_spatial_and_temporal_variations_in_streamflow_due_to_multiple_climate_change_scenarios_in_northwestern_Morocco). Acesso em: 27 set. 2024.
- ALVARES, C. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, [s. l.], v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/002465193>. Acesso em: 27 set. 2024.
- ANDRADE, C. W. L. D. *et al.* Modelagem hidrológica sob escassez de dados na Bacia do Alto Mundaú, Nordeste do Brasil. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, [s. l.], v. 2, n. 3, p. 227-238, 2017.
- ANDRADE, M. P. D.; RIBEIRO, C. B. D. M. Impacts of land use and cover change on Paraíba do Sul watershed streamflow using the SWAT model. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 25, e12, p. 1-13, 2020.
- ARMOA, O. L. B. *et al.* Representation of hydrological components under a changing climate — A case study of the Uruguay River Basin using the new version of the Soil and Water Assessment Tool Model (SWAT+). **Water**, [s. l.], v. 15, n. 14, 2604, p.1-18, 2023.
- BIEGER, K. *et al.* Introduction to SWAT+, a completely restructured version of the Soil and Water Assessment Tool. **JAWRA – Journal of the American Water Resources Association**, [s. l.], v. 53, n. 1, p. 115-130, 2017.
- BRASIL. Lei n. 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei n. 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei n. 7.990, de 28 de dezembro de 1989. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**: seção 1, Brasília, DF, p. 470, 9 jan. 1997.
- BRIGHENTI, T.; BONUMÁ, N.; CHAFFE, P. Calibração hierárquica do modelo SWAT em uma bacia hidrográfica catarinense. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 21, n. 1, p. 53-64, mar. 2016.
- CAMPOS, F. L. M. *et al.* Avaliação do SWAT+ para eventos ligados à segurança hídrica na bacia do Rio Iconha – ES. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE REDUÇÃO DE RISCOS DE DESASTRES, 4., 2023a, Vitória. **Anais do IV Congresso Brasileiro de Redução de Risco e Desastres**. Vitória: UFES, 2023.
- CAMPOS, F. L. M. *et al.* Comparação da performance de diferentes MDE's para modelagem hidrológica usando o modelo SWAT. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 20., 2023, Florianópolis. **Anais [...]**. São José dos Campos: Inpe, 2023b. p. 2647-2650. Disponível em: <https://proceedings.science/sbsr-2023/trabalhos/comparacao-da-performance-de-diferentes-mde-s-para-modelagem-hidrologica-usando?lang=pt-br>. Acesso em: 27 set. 2024.

CHEN, W. *et al.* A typical small watershed in Southwestern China is demonstrated as a significant carbon sink. **Land**, [s. l.], v. 13, n. 4, 458, p. 1-21, abr. 2024.

COLÍN-GARCÍA, G. *et al.* Evaluation of the impact of climate change on the water balance of the Mixteco River Basin with the SWAT Model. **Hydrology**, [s. l.], v. 11, n. 4, 45, p. 1-24, 2024.

COSTA, R. C. A. *et al.* Hydrologic response to land use and land cover change scenarios: An example from the Paraopeba River Basin based on the SWAT Model. **Water**, [s. l.], v. 15, n. 8, 1451, p. 1-26, 2023.

CUNHA, A. M. *et al.* Atualização da legenda do mapa de reconhecimento de solos do estado do Espírito Santo e implementação de interface no Geobases para uso dos dados em SIG. **Geografares**, Vitória, v. 2, n. 22, p. 32-65, jul./dez. 2016.

DANIEL, E. B. *et al.* Watershed modeling and its applications: A state-of-the-art review. **The Open Hydrology Journal**, [s. l.], v. 5, p. 26-50, abr. 2011. Disponível em: <https://benthamopenarchives.com/abstract.php?ArticleCode=TOHYDJ-5-26>. Acesso em: 27 set. 2024.

DELMASCHIO, B. *et al.* Análise da sensibilidade dos dados de solo na modelagem hidrossedimentológica utilizando o modelo SWAT. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 19., 2022, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: UERJ, 2022.

DEVIA, G. K.; GANASRI, B. P.; DWARAKISH, G. S. A review on hydrological models. **Aquatic Procedia**, [s. l.], v. 4, p. 1001-1007, 2015. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/276885296\\_A\\_Review\\_on\\_Hydrological\\_Models](https://www.researchgate.net/publication/276885296_A_Review_on_Hydrological_Models). Acesso em: 27 set. 2024.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (Brasil). Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Súmula da X reunião técnica de levantamento de solos**. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 1979. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/212100/1/SNLCS-Miscelania-1-1979.pdf>. Acesso em: 27 set. 2024.

GASSMAN, P. W.; SADEGHI, A. M.; SRINIVASAN, R. Applications of the SWAT Model Special Section: Overview and insights. **Journal of Environmental Quality**, [s. l.], v. 43, n. 1, p. 1-8, jan./fev. 2014.

HAWKER, L.; NEAL, J. (Orgs.). **FABDEM V0-1**. Bristol: Universidade de Bristol, 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE (Brasil). **Banco de Informações Ambientais. Unidades geomorfológicas – Espírito Santo**. [S. l.], 7 jul. 2023.

INSTITUTO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS – IEMA (Brasil). **Mapeamento ES – 2012-2015**. Vitória: IEMA, 2015. Disponível em: <https://geobases.es.gov.br/links-para-mapas1215>. Acesso em: 15 maio 2021.



KAUFFELDT, A. *et al.* Technical review of large-scale hydrological models for implementation in operational flood forecasting schemes on continental level. **Environmental Modelling & Software**, Amsterdã, v. 75, p. 68-76, jan. 2016.

KHORN, N. *et al.* Land use/land cover changes and its impact on runoff using SWAT model in the upper Prek Thnot watershed in Cambodia. **Environmental Earth Sciences**, [s. l.], v. 81, n. 446, p. 1-14, 2022.

LETA, M. K. *et al.* Sediment yield estimation and evaluating the best management practices in Nashe watershed, Blue Nile Basin, Ethiopia. **Environmental Monitoring and Assessment**, [s. l.], v. 195, n. 6, 716, p. 1-20, maio 2023.

LUO, P. *et al.* Impact of forest maintenance on water shortages: Hydrologic modeling and effects of climate change. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 615, n. 4, p. 1355-1363, 2018.

MARTINS, M. S. M. *et al.* Potential impacts of land use changes on water resources in a tropical headwater catchment. **Water**, [s. l.], v. 13, n. 22, 3249, p. 1-21, 2021.

OLIVEIRA, K. D. *et al.* Impacts of sugarcane expansion on water availability in a river basin in southeastern Brazil. **CATENA**, [s. l.], v. 216, n. B, 106437, 2022.

OLIVEIRA, V. A. *et al.* Modeling the effects of climate change on hydrology and sediment load in a headwater basin in the Brazilian Cerrado biome. **Ecological Engineering**, Amsterdã, v. 133, p. 20-31, ago. 2019. Disponível em:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925857419301284>. Acesso em: 27 set 2024.

PEREIRA, M. A. F.; BARBIEIRO, B. L.; QUEVEDO, D. M. de. Importância do monitoramento e disponibilização de dados hidrológicos para a gestão integrada dos recursos hídricos. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, v. 32, n. 32, p. 308-320, 2020.

PONTINI, V. V.; COELHO, A. L. N. Aspectos físico-sociais das inundações e enxurradas na sub-bacia de drenagem do rio Iconha, estado do Espírito Santo. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 23, n. 86, p. 139-155, 2022.

RODRIGUES, C.; ADAMI, S. F. Técnicas fundamentais para o estudo de bacias hidrográficas. *In*: **Praticando geografia: técnicas de campo e laboratório em geografia e análise ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

SHIFERAW, H. *et al.* Modelling hydrological response under climate change scenarios using SWAT model: the case of Ilala watershed, Northern Ethiopia. **Modeling Earth Systems and Environment**, [s. l.], v. 4, n. 1, p. 437-449, 2018.

SILVA, M. R. F.; COELHO, R. B. **Análise comparativa entre as manchas de inundação geradas no modelo HAND, atrelado à equação da curva-chave, e nos modelos HEC-HMS e HEC-RAS para diferentes períodos de retorno na sede do município de Iconha – ES**. 2022. Trabalho de



Conclusão de Curso (Pós-Graduação Latu Sensu em Engenharia de Infraestrutura Urbana) – Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, 2022.

SOOD, A.; SMAKHTIN, V. Global hydrological models: a review. **Hydrological Sciences Journal**, [s. l.], v. 60, n. 4, p. 549-565, 2015.

TEFERA, G. W. *et al.* Hydrological modeling and scenario analysis for water supply and water demand assessment of Addis Ababa city, Ethiopia. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, Amsterdã, v. 46, 101341, p. 1-18, abr. 2023.

TONANI, I. A. *et al.* Modelagem hidrológica utilizando dados climáticos observados e de reanálise com o modelo SWAT. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 19., 2022, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: UERJ, 2022.

VIANA, J. F. S. *et al.* Modelagem hidrológica da Bacia Hidrográfica do Rio Pirapama-PE utilizando o modelo SWAT. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, [s. l.], v. 3, n. 1, p. 155-172, 2018.

WU, T. *et al.* Identification of watershed priority management areas based on landscape positions: An implementation using SWAT+. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 619, n. 5, 129281, fev. 2023.

*Artigo submetido em: 26/07/2024*

*Artigo aceito em: 03/10/2024*

*Artigo publicado em: 30/12/2024*