

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
FACULDADE DE AGRONOMIA ELISEU MACIEL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA



Tese

DESEMPENHO DE SOFTWARES E ALGORITMOS PARA CALIBRAÇÃO DO  
MODELO SWAT+: ABORDAGEM CIENCIOMÉTRICA E AVALIAÇÃO  
COMPARATIVA

Samanta Tolentino Cecconello

Pelotas, 2024

Samanta Tolentino Cecconello

DESEMPENHO DE SOFTWARES E ALGORITMOS PARA CALIBRAÇÃO DO  
MODELO SWAT+: ABORDAGEM CIENCIOMÉTRICA E AVALIAÇÃO  
COMPARATIVA

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Doutora em Ciências.

Orientador: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maria Cândida Moitinho Nunes  
Coorientadores: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Danielle de Almeida Bressiani  
Prof. Dr. Luís Carlos Timm

Pelotas, 2024

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas  
Catalogação da Publicação

C387d Ceconello, Samanta Tolentino

Desempenho de softwares e algoritmos para calibração do modelo SWAT+ [recurso eletrônico] : abordagem cienciométrica e avaliação comparativa / Samanta Tolentino Ceconello ; Maria Cândida Moitinho Nunes, orientadora ; Danielle Bressiani, Luís Carlos Timm, coorientadores. — Pelotas, 2024.

161 f. : il.

Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, 2024.

1. Bibliometria. 2. Modelo hidrológico. 3. R-SWAT. 4. SWAT+ Toolbox. I. Nunes, Maria Cândida Moitinho, orient. II. Bressiani, Danielle, coorient. III. Timm, Luís Carlos, coorient. IV. Título.

CDD 631.43

Samanta Tolentino Ceconello

Desempenho de softwares e algoritmos para calibração do modelo SWAT+:  
abordagem cienciométrica e avaliação comparativa

Tese aprovada, como requisito parcial, para obtenção do grau de Doutora em  
Ciências, Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da  
Água, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas.

Data da Defesa: 30/08/2024

Banca Examinadora:

Prof(a). Dr(a). Maria Cândida Moitinho Nunes

Orientadora

Doutora em Ciência do Solo pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof(a). Dr(a). Edvania Aparecida Corrêa Alves

Doutora em Geografia pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita  
Filho

Prof. Dr. Leandro Sanzi Aquino

Doutor em Agronomia. Universidade Federal de Pelotas

Prof(a). Dr(a). Thais Palumbo Silva

Doutora em Ciência do Solo pela Universidade Federal de Santa Maria

Dedico este trabalho à memória daqueles que a pandemia levou, e aos sonhos que se apagaram, dedico este trabalho como um farol de esperança em tempos sombrios. Que a ciência possa nos guiar para um mundo mais justo e solidário.

## **Agradecimentos**

Acredito que tudo o que nos acontece tem um propósito. Uma nova caminhada, um novo desafio, medos, inseguranças, doenças - tudo faz parte de um plano maior que nos permite evoluir de alguma forma. Por isso, agradeço a Deus, inteligência suprema e causa primária de todas as coisas, por me permitir estar onde estou, por todas as oportunidades que me mostram o quanto sou pequena e o quanto ainda tenho que caminhar. Obrigada por me dar tudo o que preciso e por colocar ao meu lado pessoas tão especiais que me auxiliam nesta jornada.

Agradeço imensamente à minha companheira de vida, Luana, pela compreensão, amizade, amor, paciência e por construir comigo uma vida de aprendizados constantes, muita reflexão e evolução. Amo você. Não poderia deixar de agradecer aos meus filhos de quatro patas: Sophia, Lara, Kiara, Hórus, Pequeno, Branco e Tigrinho, pelo amor incondicional e companheirismo. Vocês são meu maior tesouro.

Agradeço à minha mãe, Luciane, pela vida, pelo exemplo, pelo amor, incentivo, apoio e pela compreensão de sempre. À minha irmã Sâmara e à minha sobrinha amada Júlia, por me proporcionarem momentos de alegria e felicidade quando compartilhamos um mate espumadinho e as novidades da vida. Ao meu “paidrasto” Jorge, pelas jantãs de sexta-feira, momentos em que podemos estar todos juntos. À minha irmã Maria Eduarda, por ser tão parecida e, ao mesmo tempo, tão diferente de mim. Amo vocês infinitamente.

À minha querida orientadora, Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maria Cândida Moitinho Nunes, agradeço por todo o aprendizado, carinho, atenção, compreensão, paciência e por acreditar no meu trabalho. Obrigada por me auxiliar a chegar até aqui. Também sou grata à Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Danielle Bressiani, por me apresentar o SWAT e criar em mim uma dicotomia de amor e ódio com ele, o que me fez crescer muito enquanto pessoa e profissional. Muito obrigada pela ajuda, carinho e atenção. Agradeço ao Prof. Dr. Luiz Carlos Timm pelos ensinamentos, reflexões, carinho e atenção. Vocês serão sempre meus eternos mestres.

Expresso minha gratidão à minha banca de doutoramento, Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Edvania Correa, Prof. Dr. Leandro Sanzi Aquino e a Dr.<sup>a</sup> Thais Palumbo por participarem deste momento tão especial e único na minha trajetória e por

estarem dispostos a contribuir com meu trabalho. Tenho um carinho muito especial por vocês.

Agradeço à Sociedade de Estudos Espíritas Vida por todos os momentos de aprendizado que me proporcionaram enxergar a vida com outros olhos e pelas reflexões que me permitiram conectar com a minha essência.

Sou grata aos colegas do Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água pela parceria e aprendizado, e aos meus pequenos pesquisadores do GEAMA por todos os ensinamentos e risadas. Agradeço também ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-rio-grandense pela concessão do afastamento integral para a realização deste doutorado.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, me auxiliaram ou contribuíram para que eu pudesse chegar até aqui.

MUITO OBRIGADA

## Epígrafe

*No meio do caminho tinha uma pedra  
tinha uma pedra no meio do caminho  
tinha uma pedra  
no meio do caminho tinha uma pedra.*

*Nunca me esquecerei desse acontecimento  
na vida de minhas retinas tão fatigadas.  
Nunca me esquecerei que no meio do caminho  
tinha uma pedra  
tinha uma pedra no meio do caminho  
no meio do caminho tinha uma pedra...*

*Carlos Drummond de Andrade*

## Resumo

CECCONELLO, Samanta Tolentino. **Desempenho de softwares e algoritmos para calibração do modelo SWAT+**: abordagem cienciométrica e avaliação comparativa. 2024. 161. Tese de Doutorado (Doutorado em Manejo e Conservação do Solo e da Água) – Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2024.

Nos últimos anos, o desenvolvimento de ferramentas e algoritmos para calibração e análise de incertezas do modelo SWAT avançou significativamente, mas a escolha da ferramenta mais adequada continua complexa e desafiadora, especialmente para iniciantes, devido à carência de comparações e avaliações na literatura. Este estudo investiga o desempenho dos softwares e algoritmos aplicados na análise de sensibilidade, calibração, validação e incertezas no modelo SWAT+, com o objetivo de identificar tendências e lacunas na literatura científica, além de realizar uma comparação prática entre dois softwares em uma bacia hidrográfica rural. O trabalho foi dividido em duas partes. A primeira parte visou: i) identificar autores e periódicos de destaque, períodos de calibração e validação adotados, e o tamanho das bacias hidrográficas nos estudos relacionados ao modelo SWAT; ii) examinar a evolução dos estudos sobre ferramentas computacionais do SWAT, destacando os avanços mais significativos; e iii) identificar lacunas na literatura sobre o uso de softwares e algoritmos no SWAT, apontando áreas que requerem mais investigação. Utilizou-se uma abordagem cienciométrica e revisão sistemática, concluindo que, embora o número de estudos sobre modelagem hidrológica com SWAT e SWAT+ tenha aumentado ao longo do tempo, ainda há uma carência de comparações entre softwares gratuitos, especialmente em bacias pequenas, utilizando a versão mais recente do SWAT+. A segunda parte objetivou comparar e avaliar o desempenho do modelo SWAT+ por meio dos softwares R-SWAT e SWAT+ Toolbox, utilizando os algoritmos Dynamically Dimensioned Search e Sequential Uncertainty Fitting (SUFI-2) para calibração e validação em uma pequena bacia hidrográfica rural. Os resultados indicam que o modelo SWAT+ não apresentou ajuste adequado para a vazão mensal e diária em ambos os softwares e algoritmos, apontando a necessidade de mais estudos que abordem essas limitações e busquem aprimorar a aplicabilidade prática do modelo.

Palavras-Chaves: Bibliometria. Modelo hidrológico. R-SWAT. SWAT+ Toolbox.

## ABSTRACT

CECCONELLO, Samanta Tolentino. **Performance of Software and Algorithms for Calibration of the SWAT+ Model**: A Scientometric Approach and Comparative Evaluation. 2024. 161 pages. Doctoral Dissertation (Ph.D. in Soil and Water Management and Conservation) – Graduate Program in Soil and Water Management and Conservation, Eliseu Maciel Faculty of Agronomy, Federal University of Pelotas, Pelotas, 2024.

In recent years, the development of tools and algorithms for the calibration and uncertainty analysis of the SWAT+ model has advanced significantly. However, choosing the most appropriate tool remains complex and challenging, particularly for beginners, due to a lack of comparisons and evaluations in the literature. This study investigates the performance of software, and algorithms used in sensitivity analysis, calibration, validation, and uncertainty analysis within the SWAT+ model, with the aim of identifying trends and gaps in the scientific literature, as well as conducting a practical comparison between two software programs applied to a rural watershed. The work is divided into two parts. The first part aims to: i) identify prominent authors and journals, the calibration and validation periods adopted, and the sizes of watersheds in studies related to the SWAT model; ii) examine the evolution of studies on computational tools for SWAT, highlighting the most significant advancements; and iii) identify gaps in the literature regarding the use of software and algorithms in SWAT, highlighting areas that require further investigation. A scientometric approach and systematic review were employed, concluding that, although the number of studies on hydrological modeling with SWAT and SWAT+ has increased over time, there remains a lack of comparisons between free software, especially in small watersheds using the latest version of SWAT+. The second part aimed to compare and evaluate the performance of the SWAT+ model using the R-SWAT and SWAT+ Toolbox software, applying the Dynamically Dimensioned Search and Sequential Uncertainty Fitting (SUFI-2) algorithms for calibration and validation in a small rural watershed. The results indicate that the SWAT+ model did not show an adequate fit for monthly and daily flows in both software and algorithms, highlighting the need for further studies to address these limitations and improve the practical applicability of the model.

Keywords: Bibliometrics. Hydrological modeling. R-SWAT. SWAT+ Toolbox.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma de identificação e seleção dos artigos para a avaliação cientiométrica do objeto de estudo e revisão sistemática.....	39
Figura 2 - Fluxograma com resultados da seleção dos artigos para a avaliação cientiométrica do objeto de estudo e a revisão sistemática, onde “n” é o número de artigos. ....	41
Figura 3 - Produção científica sobre ferramentas computacionais na modelagem hidrológica com o SWAT.....	43
Figura 4 - Produtividade dos autores sobre os softwares e algoritmos para calibração com o SWAT.....	44
Figura 5 - As dez principais instituições que publicaram mais artigos relacionados a algoritmos e softwares para SWAT. ....	45
Figura 6 - Países mais produtivos quanto ao tema abordado.....	46
Figura 7 - Rede de colaboração entre autores que publicaram artigos científicos contendo informações sobre os softwares e algoritmos utilizados para a calibração, validação do modelo SWAT. ....	48
Figura 8 - Produtividade dos 25 principais autores ao longo do tempo, entre 2005 e 2024.....	49
Figura 9 - Representação das palavras-chave conforme a centralidade e densidade. ....	53
Figura 10 - Campos de aplicação dos estudos capturados nas bases de dados WoS e SOPUS.....	56
Figura 11 - Percentual dos artigos encontrados na pesquisa e seu respectivos período usado para calibrar e validar o modelo SWAT. ....	58
Figura 12 - Tamanho das áreas de estudo encontradas sobre a temática abordada.....	60
Figura 13 - Principais softwares utilizados na modelagem com o SWAT. ....	62
Figura 14 - Algoritmos utilizados pelos pesquisadores do SWAT.....	64
Figura 15 - Mapa de localização da bacia hidrográfica do arroio Cadeia (BHAC) .....	72
Figura 16 - Mapa hipsométrico da bacia hidrográfica do arroio Cadeia com perfil topográfico. ....	73

Figura 17 - Tipos de solos encontrados na bacia hidrográfica do arroio Cadeia (BHAC). .....	74
Figura 18 – Distribuição das estações pluviométricas, meteorológicas e fluviométrica na área de estudo. ....	76
Figura 19 - Precipitação mensal e Vazão mensal simulada pelos softwares R-SWAT e SWAT+ Toolbox e vazão observada para a bacia do arroio Cadeia. .	99
Figura 20 - Precipitação diária e vazão diária simulada pelos softwares R-SWAT e SWAT+ Toolbox e vazão observada para a bacia do arroio Cadeia.....	103

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Os 25 artigos mais citados sobre o conhecimento científico relacionado a calibração do modelo segundo as bases de dados SCOPUS e WoS.....	51
Tabela 2 - Os 20 periódicos mais citados e seu fator de impacto referente ao ano de 2023.....	52
Tabela 3 - Estações pluviométricas, meteorológica e fluviométrica utilizadas para a bacia hidrográfica do arroio Cadeia, bem como a série histórica disponível..	75
Tabela 4 - Classes de uso e cobertura da terra para o ano de 2015 e o quantitativo da área existente na bacia hidrográfica do arroio Cadeia.....	78
Tabela 5 - Faixas dos valores inferiores e superiores dos parâmetros do SWAT+ selecionados para análise de sensibilidade e calibração para as escalas de tempo mensal e diária em ambos os softwares.....	81
Tabela 6 - Classificação do grau de importância dos parâmetros após a análise de sensibilidade. ....	82
Tabela 7 - Critérios de avaliação de desempenho do modelo hidrológico SWAT+ e faixa dos valores de variação, de acordo com os coeficientes de Nash-Sutcliffe (NSE) e Kling-Gupta Efficiency (KGE).....	83
Tabela 8 - Análise de sensibilidade mensal para a variável vazão no software R-SWAT. ....	85
Tabela 9 - Análise de sensibilidade mensal para a variável vazão no software SWAT+ Toolbox.....	87
Tabela 10 - Análise de sensibilidade diária para a variável vazão no software R-SWAT. ....	90
Tabela 11 - Análise de sensibilidade para a variável vazão em escala diária no software SWAT+ Toolbox. ....	92
Tabela 12 - Resultado da calibração mensal e diária com R-SWAT e SWAT+ Toolbox.....	96
Tabela 13 - Indicadores estatísticos que descrevem os resultados de calibração e validação do modelo SWAT+ para vazão nos softwares R-SWAT e SWAT+ Toolbox.....	97

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	16
2 OBJETIVOS E HIPÓTESES .....	20
2.1 Objetivo Geral .....	20
2.2 Objetivos Específicos .....	20
2.3 Hipóteses .....	20
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
3.1 Dinâmica hidrológica e alteração de ambientes .....	21
3.2 Modelos hidrológicos.....	24
3.3 Modelo Soil & Water Assessment Tool (SWAT).....	27
3.4 Análise de sensibilidade, calibração, validação e análise de incertezas do modelo SWAT+ .....	30
4 Capítulo 1 – SOFTWARES E ALGORITMOS PARA CALIBRAÇÃO DO MODELO <i>SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL</i> : UMA SÍNTESE BASEADA EM MAPEAMENTO CIENTÍFICO E REVISÃO SISTEMÁTICA.....	35
4.1 Introdução .....	35
4.2 Materiais e Métodos .....	38
4.2.1 Estratégia de pesquisa e elegibilidade.....	38
4.2.2 Avaliação cienciométrica e revisão sistemática .....	39
4.3 Resultados e Discussão.....	41
4.3.1 Avaliação cienciométrica .....	41
4.3.2 Revisão sistemática.....	55
4.3.2.1 Campos de aplicação do modelo SWAT .....	55
4.3.2.2 Período temporal adotado para calibração e validação ...	57
4.3.2.3 Tamanho da área de estudo .....	60
4.3.2.4 Softwares e algoritmos .....	61
4.4 Conclusão .....	65

5 CAPÍTULO 2 – ANÁLISE DE DESEMPENHO DO MODELO SWAT+: ESTUDO COMPARATIVO ENTRE DIFERENTES SOFTWARES E ALGORITMOS .....	67
5.1 Introdução .....	67
5.2 Material e Métodos .....	71
5.2.1 Área de Estudo .....	71
5.2.2 Configurações do modelo SWAT+ .....	74
5.2.3 Análise de sensibilidade global dos parâmetros .....	80
5.2.4 Calibração e validação do modelo .....	82
5.2.5 Análise de incertezas .....	84
5.3 Resultados e Discussão .....	85
5.3.1 Análise de sensibilidade global .....	85
5.3.1.1 Sensibilidade global para vazão mensal .....	85
5.3.1.2 Sensibilidade global para vazão diária .....	90
5.3.2 Calibração, validação e análise de incertezas do modelo SWAT+ .....	96
5.3.2.1 Vazão mensal .....	97
5.3.2.2 Vazão diária .....	101
5.4 Conclusão .....	106
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	108
REFERÊNCIAS .....	111
APÊNDICE .....	129
Apêndice A – Artigos obtidos após o processo de triagem e elegibilidade. ....	130
Apêndice B – Calendário agrícola para as culturas predominantes na bacia hidrográfica do arroio Cadeia .....	159

## 1 INTRODUÇÃO

A importância da conservação da água e do solo transcende a esfera ecológica, tendo implicações diretas para a segurança alimentar, o desenvolvimento econômico e o bem-estar humano (Shivhare; Dikshit; Dwivedi, 2018). Em muitas regiões do mundo, a exploração dos recursos hídricos e a má gestão das terras agrícolas resultam em degradação ambiental severa, comprometendo a resiliência dos ecossistemas e a capacidade das bacias hidrográficas de sustentarem serviços ecossistêmicos essenciais (Krnáčová et al., 2024).

A crescente demanda por recursos hídricos e a intensificação dos impactos antropogênicos sobre os ecossistemas naturais exigem abordagens inovadoras para a gestão e conservação das bacias hidrográficas (Pinheiro; Galvêncio, 2023). Em um cenário global de mudanças climáticas, urbanização e degradação ambiental acelerada, a análise integrada do ambiente se torna fundamental para a compreensão dos complexos processos que regulam a dinâmica da água e do solo em diferentes escalas espaciais e temporais (Aawar; Khare, 2020). A modelagem hidrológica emerge como uma ferramenta poderosa para esta análise. Essa ferramenta permite não apenas o monitoramento e a previsão de eventos hidrológicos, mas também a avaliação das interações entre variáveis ambientais, proporcionando subsídios fundamentais para a formulação de políticas de gestão sustentável (Mebarki; Maref; Dris, 2024; Sheikh; Coulibaly, 2024).

A modelagem hidrológica, ao integrar dados climáticos, topográficos, edáficos e de uso e cobertura da terra, possibilita a simulação de cenários futuros e a avaliação dos efeitos de diferentes práticas de manejo sobre a disponibilidade e qualidade da água. Essa abordagem permite identificar áreas de risco, otimizar o uso dos recursos hídricos e implementar estratégias de conservação do solo que minimizem a erosão e a sedimentação (Wang et al., 2019). Além disso, a modelagem hidrológica serve como uma plataforma para a

integração de múltiplas disciplinas, promovendo a colaboração entre hidrólogos, ecologistas, engenheiros e gestores ambientais, o que é vital para enfrentar os desafios da gestão de bacias hidrográficas de maneira eficaz.

Para que a modelagem hidrológica se estabeleça como uma ferramenta efetiva na gestão de bacias hidrográficas, é preciso garantir a precisão e a confiabilidade das simulações ocorram por meio de um rigoroso processo de calibração, validação e análises de incertezas (Bayat; Alizadeh; Mojaradi, 2023; Liu et al., 2023; Wu et al., 2022). A calibração envolve o ajuste dos parâmetros do modelo para que as saídas simuladas correspondam aos dados observados, enquanto a validação é o processo de testar a performance do modelo utilizando um conjunto de dados independente, geralmente de um período diferente do usado na calibração (Arnold et al., 2012). Já a análise de incertezas refere-se à avaliação da incerteza nas previsões do modelo, que pode surgir de várias fontes, incluindo erros nos dados de entrada, simplificações nos processos modelados e incertezas nos parâmetros (Yang et al., 2008). Essas abordagens asseguram que os modelos hidrológicos sejam representativos da realidade e possam ser aplicados com confiança na previsão de cenários futuros.

Modelos hidrológicos, como o *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT), por exemplo, desempenha um papel essencial na análise integrada do ambiente, pois permite simular cenários futuros sendo uma ferramenta poderosa para a tomada de decisões estratégicas no planejamento e gestão das bacias hidrográficas. Ele permite que gestores ambientais e formuladores de políticas avaliem diferentes estratégias de manejo e seu impacto potencial, promovendo decisões informadas que buscam equilibrar o desenvolvimento humano com a conservação dos recursos naturais.

Em um contexto de mudanças climáticas, onde os regimes de precipitação e evapotranspiração estão em transformação, a capacidade de prever as respostas hidrológicas das bacias hidrográficas é fundamental para adaptar e mitigar os efeitos adversos sobre os recursos hídricos (Feng et al., 2010; Maru et al., 2023). Além disso, a aplicação de modelos hidrológicos bem calibrados e validados facilita a identificação de áreas críticas dentro da bacia, que necessitam de intervenção prioritária para conservação do solo e gestão da água.

Nos últimos anos, houve avanços significativos nos softwares e algoritmos utilizados para a calibração, validação, análise de sensibilidade e incertezas do modelo SWAT. Ferramentas como o SWAT-CUP, IPEAT (Integrated Parameter Estimation and Uncertainty Analysis Tool), R-SWAT e SWAT *Toolbox* oferecem diferentes abordagens para otimizar e ajustar o modelo a dados observacionais (Harifidy *et al.*, 2024). No entanto, a escolha do *software* e do algoritmo adequado continua a ser um desafio, especialmente para usuários iniciantes, devido à complexidade das opções disponíveis e às lacunas existentes na literatura em termos de comparação e avaliação dessas ferramentas (Nti *et al.*, 2021).

Diante desse cenário, este estudo foi estruturado em dois capítulos com objetivos distintos, mas complementares, visando contribuir para a compreensão e aprimoramento do uso do modelo SWAT+. O primeiro capítulo busca analisar a evolução dos estudos sobre *softwares* e algoritmos associados ao SWAT+, utilizando uma abordagem cienciométrica para mapear as tendências, identificar os principais autores e publicações e destacar lacunas na literatura científica. Este capítulo busca fornecer uma visão abrangente do desenvolvimento científico e tecnológico na área, permitindo identificar áreas que necessitam de maior investigação e desenvolvimento.

O segundo capítulo foca na comparação prática de diferentes softwares para calibração do modelo SWAT+ em uma pequena bacia hidrográfica rural no sul do Rio Grande do Sul. Este capítulo visa avaliar a aplicabilidade e a eficácia dos diferentes programas em um cenário real, oferecendo *insights* valiosos para pesquisadores e gestores que precisam tomar decisões adequadas sobre qual *software* e algoritmo escolher. A escolha da bacia hidrográfica rural se deu em virtude da importância socioambiental e econômica que esta apresenta para a região sul do Rio Grande do Sul.

Este estudo pretende fornecer uma base sólida para futuros pesquisadores e profissionais da área, auxiliando na escolha de ferramentas e técnicas mais adequadas para a análise da sensibilidade dos parâmetros, calibração e validação do SWAT+, além de identificar oportunidades para o desenvolvimento de novas tecnologias e métodos. Ao abordar tanto a evolução teórica quanto a aplicação prática dos softwares de calibração do SWAT+, este

estudo busca preencher lacunas críticas na literatura e contribuir para a melhoria das práticas de gestão de recursos hídricos. Assim, espera-se que os resultados deste estudo não apenas ampliem o conhecimento existente, mas também ofereçam suporte valioso para a tomada de decisões em contextos de gestão e conservação de bacias hidrográficas.

## **2 OBJETIVOS E HIPÓTESES**

### **2.1 Objetivo Geral**

Analisar o desempenho dos softwares e algoritmos utilizados para a análise de sensibilidade, calibração, validação e incertezas no modelo SWAT+, visando identificar tendências e lacunas na literatura científica, além de realizar uma avaliação comparativa entre o R-SWAT e SWAT+ Toolbox em uma aplicação prática para uma bacia hidrográfica rural.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Realizar uma análise cienciométrica sobre a evolução dos estudos sobre os softwares e algoritmos aplicados ao modelo SWAT+, focando em tendências, avanços tecnológicos e lacunas na literatura científica.

- Comparar o desempenho entre dois softwares gratuitos para calibração e validação do modelo SWAT+ em uma bacia hidrográfica rural do sul do Rio Grande do Sul, analisando sua eficiência e aplicabilidade prática.

### **2.3 Hipóteses**

- O avanço em hardware e computação de alto desempenho tem impulsionado o uso de algoritmos mais complexos e softwares de código aberto, para calibrar o modelo SWAT+.

- Há uma diferença significativa na eficiência e precisão dos resultados de análise de sensibilidade, calibração, validação e análise de incertezas entre dois softwares gratuitos quando aplicados a uma bacia hidrográfica rural.

## 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 3.1 Dinâmica hidrológica e alteração de ambientes

O movimento cíclico da água, conhecido como ciclo hidrológico, é um processo dinâmico essencial para a manutenção da vida na Terra. Esse ciclo é impulsionado por três fontes principais de energia: solar, gravitacional e de rotação terrestre, que desencadeiam uma série de processos hidrológicos interconectados (Odinaev *et al.*, 2023). A energia solar é a força motriz por trás da evaporação da água dos oceanos, lagos e rios, transformando-a em vapor que sobe para a atmosfera. Na atmosfera, o vapor se condensa em nuvens e retorna à superfície terrestre sob a forma de precipitação. Este movimento vertical da água é fundamental para a distribuição global de recursos hídricos (Brocca *et al.*, 2024).

Além do fluxo vertical, a água também se move longitudinalmente, seguindo gradientes tanto na superfície quanto no subsolo (Heidelman; Vural, 2023). Este fluxo longitudinal é vital para o transporte de nutrientes e sedimentos, além de moldar a paisagem através do escoamento superficial e do fluxo subterrâneo (Şen, 2023). O escoamento superficial ocorre quando a água da chuva ou do degelo flui sobre a terra, alimentando rios, lagos e eventualmente retornando aos oceanos. Simultaneamente, parte da água infiltra no solo, movendo-se através de camadas subterrâneas até atingir aquíferos ou retornar à superfície em nascentes (Odinaev *et al.*, 2023).

Os processos hidrológicos são fundamentais para o funcionamento do ciclo da água na natureza, composto pela água em seus diversos estados físicos (Mebarki; Maref; Dris, 2024). A incidência de radiação solar sobre a Terra provoca a evaporação da água de reservatórios hídricos e a transpiração dos solos e vegetações, passando a água do estado líquido para o gasoso. Durante esse processo, a água se integra ao sistema de circulação atmosférica, influenciada por diferenças de absorção de energia e reflectância entre regiões de diferentes latitudes, como trópicos e zonas polares (Tourelle, 2021). A condensação da água na atmosfera resulta na formação de nuvens, que eventualmente se precipitam sob determinadas condições. A precipitação

é frequentemente associada à chuva, dada sua importância no ciclo hidrológico e facilidade de medição (Segovia-Cardozo; Bernal-Basurco; Rodríguez-Sinobas, 2023). Contudo, formas de precipitação como neve, granizo, orvalho e outras também desempenham papéis significativos, variando entre si nos estados físicos da água.

A precipitação é uma variável climática importante para determinar o balanço hídrico, pois representa a principal fonte de entrada de água do ciclo hidrológico na superfície terrestre (Neitsch *et al.*, 2011). Quando a precipitação atinge o solo, ela pode se infiltrar ou escoar superficialmente. Esses processos dependem de variáveis como a capacidade de infiltração do solo, que é influenciada por características como granulometria e composição química, bem como pela cobertura vegetal que varia entre florestas, campos, áreas agrícolas e outros usos antrópicos (Tucci, 2012).

De acordo com o autor supracitado, uma parte significativa da água da chuva é armazenada pela vegetação, onde ocorre a evapotranspiração de volta à atmosfera. Esse processo de redistribuição da água através da vegetação é conhecido como interceptação (Pruski *et al.*, 2004). A densidade da vegetação altera o volume de água interceptada e perdida para a atmosfera, com florestas geralmente interceptando mais água do que áreas agrícolas ou pastagens (Nicoletti; Refosco; Pinheiro, 2022). A interceptação contribui para o retardamento do escoamento superficial, diminuindo a força das gotas de chuva e protegendo o solo da erosão. Assim, ela atua como um elemento regulador e armazenador de precipitação (Bertoni; Lombardi Neto, 2012; Tucci, 2012).

Além da precipitação direta no solo, a água interceptada chega ao solo por meio de precipitação interna e escoamento pelo tronco das plantas. No solo, a água pode infiltrar, escoar superficialmente ou evaporar. A infiltração é o processo em que a água penetra no solo, como quando a chuva cai e começa a se mover para baixo, através das camadas de terra. No início, a infiltração é rápida, mas gradualmente desacelera até atingir um ponto estável, quando o solo não consegue mais absorver água porque está completamente saturado (Brandão *et al.*, 2006). Esse movimento da água através do solo, conhecido como percolação, é fundamental para a formação e desenvolvimento das camadas do solo. A eficiência desse processo depende de vários fatores, como a porosidade do solo, a quantidade de umidade presente, a atividade biológica (como a presença de minhocas e outros organismos), a cobertura

vegetal, a rugosidade da superfície do solo e a inclinação do terreno (Salem *et al.*, 2020).

O manejo do solo, especialmente na agricultura, tem impacto direto na infiltração. O revolvimento do solo, por exemplo, pode aumentar a infiltração e diminuir o escoamento, enquanto a compactação do solo por tráfego intenso de máquinas reduz a infiltração (Jobbágy *et al.*, 2023). Solos com florestas geralmente têm alta capacidade de infiltração comparados a pastagens degradadas por pisoteio de animais ou uso inadequado de máquinas, o que aumenta a resistência do solo à penetração e diminui a porosidade (Nassir; Mishall; mohammed, 2024).

Por sua vez, a urbanização resulta em maior impermeabilização do solo, reduzindo a infiltração e o fluxo subsuperficial em bacias hidrográficas (Oñate-Valdivieso; Oñate-Paladines; Collaguazo, 2022). O movimento de infiltração é vital para a recarga de aquíferos, que ocorre quando a água infiltra e percola em solos permeáveis até alcançar os aquíferos subterrâneos, contribuindo para o lençol freático e mananciais. A água infiltrada também pode gerar escoamento subsuperficial, fluindo através dos canais do solo até a superfície ou um corpo d'água (Tucci, 2012).

Segundo Li *et al.* (2023), os processos hidrológicos subsuperficiais são tão importantes quanto os superficiais. Quando a precipitação supera a capacidade de infiltração em solos saturados ou em superfícies impermeáveis, ocorre o escoamento superficial (Brandão *et al.*, 2006). Este é definido como o movimento da água sobre a superfície da terra quando o solo está saturado ou impermeável (Li *et al.*, 2023). De acordo com Xu *et al.* (2022), o escoamento superficial em uma bacia hidrográfica é influenciado por vários fatores, como a sinuosidade dos canais, a forma do terreno e o uso da terra. Estudos verificaram que maiores coberturas vegetais e maior rugosidade do solo podem, reduzir o escoamento superficial (Hnativ; Yakhno; Hnativ, 2023; Papanicolaou *et al.*, 2018). Além disso, a presença de florestas desempenha um papel importante na regulação do escoamento superficial, prevenindo a erosão do solo e estabilizando os leitos dos rios (Nicoletti; Refosco; Pinheiro, 2022).

Diante da complexidade dos processos hidrológicos e das interações antrópicas sob o ambiente, alterando a dinâmica da água, os modelos hidrológicos surgem como ferramentas importante para identificar e simular mudanças nos cenários hidrológicos, ajudando a compreender os limites da interferência humana e a desenvolver estratégias de gestão e planejamento ambiental (Janjić; Tadić, 2023).

### 3.2 Modelos hidrológicos

A modelagem hidrológica é uma ferramenta poderosa para a compreensão, previsão e gestão dos recursos hídricos. Ela desempenha um papel fundamental ao fornecer representações simplificadas de processos hidrológicos reais, permitindo a análise e interpretação de dados hidrológicos coletados (Sahu; Shwetha; Dwarakish, 2023).

Os processos hidrológicos fundamentais incluem a precipitação, interceptação vegetal, evapotranspiração, infiltração e escoamento superficial. Estes fenômenos podem ser representados por meio de modelos matemáticos que extraem informações valiosas dos dados coletados (Tegegne et al., 2019). É importante reconhecer que esses modelos não resolvem problemas por si mesmos, mas permitem a análise de soluções potenciais com base em resultados mais confiáveis, após calibração e validação adequadas (Herrera; Marazuela; Hofmann, 2022).

Os modelos hidrológicos podem ser classificados de várias maneiras, considerando aspectos como a representação do sistema, relações temporais e espaciais, e o tipo de variáveis usadas. De acordo com (Christofolletti, 1999), as classificações incluem:

- Tipo de representação do sistema: Modelos físicos (conceitual) ou matemáticos.
- Relações temporais: Modelos estáticos ou dinâmicos.
- Relações entre variáveis: Modelos empíricos ou descritivos.
- Tipos de variáveis: Modelos estocásticos ou determinísticos.
- Relações espaciais: Modelos pontuais ou distribuídos.
- Finalidade: Modelos de balanço hídrico ou preditivos.
- Forma de representação dos dados: Modelos contínuos ou baseados em eventos.

Cada tipo de modelo possui características únicas que os tornam adequados para diferentes aplicações. De acordo com Devia, Ganasri e Dwarakish (2015), modelos físicos buscam representar processos de uma bacia hidrográfica utilizando equações diferenciais parciais baseadas na física do fluxo. Esta abordagem proporciona uma representação detalhada dos processos hidrológicos, permitindo

uma simulação mais precisa e fiel à realidade dos fenômenos naturais. No entanto, a complexidade desse tipo de modelo requer uma quantidade substancial de dados de entrada, além de alta capacidade computacional para processamento (Zhang et al., 2021).

Por outro lado, os modelos conceituais oferecem uma visão mais simplificada do sistema hidrológico (Devia; Ganasri; Dwarakish, 2015). Eles combinam componentes empíricos e físicos para simular o comportamento da bacia, tentando equilibrar a complexidade e a simplicidade. Já os modelos de caixa preta adotam uma abordagem bastante distinta dos modelos físicos e conceituais. Eles se concentram em relacionar matematicamente as entradas com as saídas do sistema, sem considerar os processos internos que ocorrem entre elas (Devia; Ganasri; Dwarakish, 2015).

Desta forma, a seleção de um modelo hidrológico apropriado é, de fato, uma decisão desafiadora, devido ao seu impacto direto na precisão dos resultados, conforme destacado por Ali et al. (2023). Fatores como a escala e a complexidade da bacia hidrográfica, a disponibilidade de dados e os objetivos do estudo desempenham papéis fundamentais nesse processo de seleção (Alemu et al., 2023).

Visando auxiliar na seleção dos modelos para melhor representar os processos hidrológicos, vários modelos hidrológicos têm sido desenvolvidos ao longo dos anos, cada um com características específicas para diferentes aplicações. Alguns exemplos notáveis incluem: HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System), EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator), CREAMS (Chemicals, Runoff, Erosion from Agricultural Management Systems), WEPP (Water Erosion Prediction Project), SWAT (Soil & Water Assessment Tool), LASH (Lavras Simulation of Hydrology) e MGB (Modelo de Grandes Bacias - IPH). Esses modelos, entre outros, são usados para simular diferentes aspectos dos processos hidrológicos, sendo os dois últimos desenvolvidos por instituições brasileiras. Portanto, cada um desses modelos oferece vantagens distintas e é escolhido com base em suas capacidades, requisitos de dados e objetivos específicos de aplicação (Ávila et al., 2022).

De acordo com Sahu, Shwetha e Dwarakish (2023), a integração de modelos hidrológicos com Sistemas de Informação Geográfica (SIG) aprimora ainda mais sua aplicabilidade, permitindo uma análise detalhada e precisa de grandes áreas. Entretanto, a modelagem hidrológica enfrenta desafios significativos, como a

necessidade de dados de alta qualidade e séries geralmente longas, para que o procedimento de calibração e validação seja adequado (Herrera; Marazuela; Hofmann, 2022). Além disso, a seleção do método de calibração também é importante, especialmente em bacias com alta variabilidade espacial (Leta et al., 2015; Nkiaka; Nawaz; Lovett, 2018). Desta forma, fatores como o conhecimento que a equipe de modeladores possui sobre o modelo e sobre a área a ser estudada, a disponibilidade em se manipular informações através do código do modelo, bem como a existência ou não de uma interface amigável e intuitiva, além do suporte técnico, influenciam na escolha do modelo (Melsen et al., 2019). Para Addor e Melsen (2019), o processo de escolha de um modelo hidrológico é muitas vezes mais influenciado pelo legado e familiaridade dos usuários com determinados modelos do que pela adequação desses modelos para a situação específica. Para os autores, essa preferência pode obscurecer outros fatores importantes, como o conhecimento técnico necessário, a capacidade de manipular o código, a interface do usuário, e o suporte técnico disponível.

O *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) tem se estabelecido como um dos modelos hidrológicos mais amplamente utilizados e preferidos por pesquisadores e profissionais da área de gestão de recursos hídricos (Mebarki; Maref; Dris, 2024). Esse destaque deve-se a vários fatores que o tornam uma escolha sólida em comparação com outros modelos hidrológicos. Primeiramente, o SWAT é altamente versátil, sendo capaz de simular uma ampla gama de processos hidrológicos e ambientais (Abbaspour et al., 2015; Arnold et al., 2012). Isso inclui a movimentação hídrica, o transporte de sedimentos, o crescimento de vegetação e o ciclo de nutrientes. Essa abrangência permite que ele seja aplicado em diversos cenários e regiões, desde pequenas bacias até grandes sistemas hidrográficos (Mebarki; Maref; Dris, 2024).

Uma característica que diferencia o SWAT de outros modelos é sua capacidade de dividir a bacia hidrográfica em sub-bacias e, posteriormente, em Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs). Esse detalhamento espacial oferece um nível de precisão que muitos outros modelos não conseguem alcançar. A integração do SWAT com Sistemas de Informação Geográfica (SIG) é outra vantagem significativa. Essa integração facilita a manipulação de grandes volumes de dados e o gerenciamento eficiente de informações espaciais (Neitsch et al., 2011). Com isso, os usuários podem

realizar análises complexas de forma mais ágil e precisa, o que é fundamental para a tomada de decisões em projetos de gestão de recursos hídricos. Outro ponto forte do SWAT é sua crescente comunidade de usuários. Este grupo ativo de usuários e desenvolvedores oferece suporte técnico valioso e promove a troca de conhecimento, proporcionando uma rede de recursos que inclui tutoriais, fóruns de discussão e estudos de caso (Gassman et al., 2007). Essa comunidade ativa é essencial para resolver problemas práticos e fomentar o desenvolvimento contínuo de novas aplicações do modelo.

Além disso, o SWAT é uma ferramenta de código aberto, o que a torna acessível e econômica para uma ampla gama de usuários. Sua natureza *open-source* permite personalizações e ajustes conforme as necessidades específicas de cada projeto, sem os custos associados a licenças de software proprietárias. Essa característica é especialmente atraente para agências governamentais e instituições acadêmicas com recursos financeiros limitados. Por fim, o SWAT oferece várias opções de softwares e algoritmos de calibração, permitindo ajustes finos do modelo às condições específicas da bacia hidrográfica em estudo. Essa flexibilidade é importante para obter resultados precisos e confiáveis, especialmente em regiões com variabilidade espacial significativa e carência de dados observados. A calibração adequada garante que o modelo reflita com precisão os processos hidrológicos reais, aumentando sua eficácia como ferramenta de planejamento e gestão de recursos hídricos.

### **3.3 Modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT)**

Como mencionamos anteriormente o SWAT é um modelo hidrológico distribuído, conceitual, determinístico e contínuo, opera em um passo de tempo anual, mensal, diário e sub-diário e foi desenvolvido para avaliar o impacto do manejo do uso da terra no ciclo hidrológico e na transferência de material (solo, nutrientes e transporte e destino de produtos químicos orgânicos) na escala da bacia hidrográfica, sendo acoplado a um ambiente SIG (Brighenti et al., 2019). Deste modo, segundo Andrade *et al.* (2017) o modelo permite que diferentes processos físicos sejam simulados em uma bacia hidrográfica. O modelo foi desenvolvido em 1996 nos EUA pelo *Agricultural Research Service* e pela *Texas A&M University* para prognosticar o

impacto das práticas de gestão do solo nos recursos hídricos e a produção de sedimentos em bacias hidrográficas, com diferentes tipos de solo, uso e cobertura, características de terreno e diferentes práticas de manejo, após um longo período (Neitsch et al., 2011). O modelo possui cinco versões oficiais principais: SWAT2000, SWAT2005, SWAT2009, SWAT2012 e SWAT+. Uma descrição detalhada da evolução do modelo pode ser encontrada em (Arnold et al., 2012). A versão mais atual do SWAT é o SWAT+ também conhecido como SWAT plus. Esta versão foi reestruturada por Bieger et al. (2017), e segundo os autores, a principal mudança foi a implementação de unidades de paisagem e fluxo de poluentes pela paisagem.

O SWAT+ simula o crescimento das culturas, transporte de sedimentos, água, nutrientes e agrotóxicos com base na equação de balanço hídrico, pois este é a força motriz por trás de outros processos, como a movimentação de sedimentos, nutrientes, agrotóxicos e etc. A Equação 1 exemplifica o balanço hídrico que o SWAT+ simula.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R - Q_{surf} - E_a - w_s - Q_{gw}) \quad (1)$$

Em que  $SW_t$  é o teor de água final no solo (mm),  $SW_0$  é o teor de água inicial no solo no dia  $i$  (mm),  $t$  é o tempo (dias),  $R$  é a quantidade de precipitação no dia  $i$  (mm),  $Q_{surf}$  é a quantidade de escoamento superficial no dia  $i$  (mm),  $E_a$  é a quantidade de evapotranspiração no dia  $i$  (mm),  $w_s$  é a quantidade de água que entra e é armazenada na zona vadosa do solo no dia  $i$  (mm) e  $Q_{gw}$  é a quantidade de fluxo de retorno no dia  $i$  (mm).

O SWAT+ é um modelo que opera integrado a um Sistema de Informações Geográficas. Vários softwares permitem a integração com o SWAT+, dentre eles o GRASS-SWAT, o ArcGIS-SWAT e mais recentemente o QSWAT. De acordo com (Dile et al., 2016), o QSWAT é escrito em linguagem Python, considerada uma linguagem de programação de alto nível e cada vez mais popular. Ele destina-se a oferecer suporte à legibilidade do código, que é um recurso útil para um projeto *open source* como QSWAT. A interface do QSWAT permite a geração e análise de dados geoespaciais necessários para o uso do modelo SWAT+, bem como promove a leitura, armazenamento e transformação de dados tabulares como os de clima, propriedades do solo, dentre outros (Thavhana; Savage; Moeletsi, 2018). Os componentes básicos do modelo incluem clima, hidrologia (escoamento superficial,

percolação, interceptação, infiltração, escoamento subsuperficial, escoamento de base e evapotranspiração), crescimento de plantas, erosão/sedimentação, nutrientes, agrotóxicos e manejo da terra.

De acordo com Arnold *et al.* (2012), os principais dados de entrada do SWAT+ e suas atualizações são: dados climáticos (dados diários de precipitação, temperatura máxima/mínima do ar, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa do ar); parâmetros de solos (propriedades físicas e químicas dos solos); dados de relevo (Modelo Digital de Elevação); dados dos tipos de solos (mapa pedológico); dados de uso do solo (mapa de uso e cobertura) e os parâmetros de vegetação (dados de espécies vegetais, crescimento vegetal, índice foliar entre outros). Segundo (Neitsch *et al.*, 2011), o modelo SWAT+ utiliza uma abordagem de zona de fluxo para representar a distribuição espacial dos processos hidrológicos em uma bacia hidrográfica. A bacia hidrográfica é dividida em sub-bacias, que são compostas por várias zonas de fluxo, como o solo, a vegetação, o lençol freático e os canais de escoamento.

O modelo SWAT+ é espacialmente discretizado em sub-bacias que, por sua vez, são subdivididas em unidades de paisagem ou landscape (áreas mais elevadas e áreas de várzea) e posteriormente em HRUs (Hydrologic Response Units – Unidades de Resposta Hidrológica). Cada HRU é composta por características comuns de declividade, tipo de solo e uso do solo dentro de cada sub-bacia, fornecendo uma descrição física melhor das unidades homogêneas, onde parte dos processos são calculados (Arnold *et al.*, 2012; Kateb *et al.*, 2020; Santos *et al.*, 2021). A HRU é a unidade fundamental em que o balanço hídrico é definido. Os processos são calculados em cada sub-bacia e posteriormente adicionados ao fluxo dos canais principais (Arnold *et al.*, 2012; Neitsch *et al.*, 2011).

De acordo com Arnold *et al.* (2012) e Bieger *et al.* (2017), o SWAT+ diferencia os fenômenos hidrológicos que se verificam em uma bacia hidrográfica em duas componentes. Na primeira componente estão os que pertencem à fase terrestre do ciclo hidrológico, ou seja, as que determinam as quantidades de água, sedimentos, nutrientes e cargas de pesticidas que serão conduzidas para a calha principal em cada sub-bacia. Nesta componente é quantificado o escoamento superficial, evapotranspiração real e potencial, deslocamento da água pelas camadas do solo, fluxo de base, níveis de erosão, entre outros. A segunda componente estão os fatores

que pertencem a fase aquática, estão aqueles processos que se referem ao movimento da água, sedimentos, pesticidas, nutrientes, através da rede hídrica, desde o ponto da geração até o exutório da bacia (Arnold *et al.*, 2012; Bieger *et al.*, 2017).

### **3.4 Análise de sensibilidade, calibração, validação e análise de incertezas do modelo SWAT+**

Por ser um modelo que está continuamente em desenvolvimento e ser de domínio público, o SWAT+ pode ser utilizado e adaptado para diferentes realidades físicas, sendo amplamente utilizado em todo o mundo para prever a perda de solos por erosão hídrica em bacias hidrográficas (Choukri *et al.*, 2019). Contudo, é preciso ressaltar que os modelos hidrológicos buscam representar a realidade e, portanto, apresentam limitações e grau de incerteza (Andrade *et al.*, 2017; Singh; Jha, 2021). De acordo com Malik, Dar e Jain (2022), essas incertezas superestimam ou subestimam os processos hidrológicos e levam a escolhas erradas. Desta forma, é fundamental que sejam realizadas as etapas de análise de sensibilidade, calibração, validação e análise de incerteza. Estas fornecerão informações sobre o grau de confiabilidade dos resultados gerados na modelagem e assim, permitirão quantificar e representar um intervalo de valores de parâmetros que busca capturar os processos e dinâmicas do fenômeno modelado (Bressiani, 2016; Mauri *et al.*, 2020; Silva, 2010).

Com relação aos estudos sobre o SWAT no Brasil, Bressiani *et al.* (2015), comentam que apenas 66% destes estudos calibraram e 23% validaram o modelo, sendo que os estudos que realizaram a calibração e validação do modelo, utilizaram pequenas séries históricas, menos de 5 anos, o que provoca uma incerteza na simulação, ou seja, os dados preditos pelo modelo, podem não representar a realidade da bacia em estudo, tornando o uso do modelo inadequado, devendo nesta etapa ter muito cuidado. Estudos realizados por Fadhilah, Kusratmoko e Kuswantoro (2018), Merina *et al.* (2019), Pan, Yuan e Jing (2020) e Vigiak *et al.* (2015), salientam a necessidade da realização da calibração e validação do modelo SWAT e suas atualizações para que os mesmos possam ser aplicados na gestão dos recursos naturais.

O primeiro passo a ser realizado na modelagem utilizando o SWAT+ é a análise de sensibilidade que consiste na determinação dos parâmetros mais sensíveis para

uma determinada bacia (Alp; Demirel; Aşıkoğlu, 2022; Arnold et al., 2012). A análise de sensibilidade estabelece quais são os parâmetros mais importantes para a bacia, permitindo racionalizar a etapa de calibração e fixar os parâmetros insensíveis. Existem diferentes técnicas para realizar a análise de sensibilidade, sendo geralmente classificadas como abordagens locais ou globais (Bressiani, 2016; Silva, 2010). Abordagens locais analisam a variabilidade da saída do modelo para mudanças de um parâmetro do modelo, enquanto os outros permanecem constantes. Portanto, eles não levam em conta as interações entre os parâmetros. As abordagens de análise de sensibilidade global medem a variabilidade de saída levando em consideração as mudanças em todos os parâmetros selecionados ao mesmo tempo. De acordo com Abbaspour *et al.* (2015), quanto menor for a variação no valor da função devido a alterações nos valores do parâmetro, menos sensível é o parâmetro no modelo.

Segundo Fadhilah, Kusratmoko e Kuswantoro (2018), o uso do SWAT+ deve ser ajustado sempre que houver alteração da área de estudo, pois os parâmetros do modelo irão apresentar um comportamento diferente. Deste modo, para que o modelo seja capaz de estimar adequadamente a realidade dos processos que ocorrem na bacia hidrográfica, os mesmos deverão ser identificados e calibrados.

Para Abbaspour et al. (2015) e Arnold et al. (2012), o próximo passo após a análise de sensibilidade é a calibração. Segundo Makumbura et al. (2022), a calibração consiste em alterar os valores dos parâmetros e avaliar as diferenças entre as saídas do modelo. A calibração, assim como a análise de sensibilidade e incerteza podem ser realizadas de forma manual, automática ou combinada, possibilitando ser avaliada por parâmetros estatísticos e ou gráficos (Bressiani, 2016; Kmoch et al., 2022). Com a calibração manual onde o modelo apresenta muitos parâmetros, pode tornar-se trabalhoso e difícil este processo, sendo que o sucesso da análise de sensibilidade se torna dependente da experiência do modelador. Por outro lado, a calibração automática usa métodos de otimização para determinar o melhor ajuste e pode ser menos subjetivo e exigir menos trabalho, porém, exige muitas simulações o que torna o processo mais demorado e exige um processamento computacional maior (Alp; Demirel; Aşıkoğlu, 2022; Kmoch et al., 2022; Silva, 2010).

Na versão do SWAT+ o dispositivo automático de pós processamento para a análise de sensibilidade e calibração foram incluídos e modificados na versão do SWAT+ Editor (interface para edição dos parâmetros e equações do modelo). Para

efetuar a análise de sensibilidade e calibração dos parâmetros de forma automática há outras opções e o usuário deve realizá-lo em software específico, como o SWAT-CUP (Calibration and Uncertainty Program – Programa de Calibração e Incerteza) desenvolvido por Abbaspour *et al.* (2015), IPEAT+ (Ferramenta de Análise Integrada de Estimativa de Parâmetros e Análise de Incerteza Plus) criada por (Yen *et al.*, 2019); R-SWAT que é um pacote do software R e foi desenvolvido por (Nguyen *et al.*, 2022) e o SWAT+ Toolbox (Chawanda, 2021). O R-SWAT fornece funções para atualização de arquivos de entrada do SWAT+; análise de sensibilidade de parâmetros; calibração e análise de incerteza; paralelização; extração de saída do modelo e avaliação de desempenho do modelo e ainda permite a visualização dos resultados do modelo. Independentemente do software escolhido para realização das análises de sensibilidade, calibração e validação do modelo, é preciso definir uma função objetivo, ou seja, uma medida de permanência de calibração (Arnold *et al.*, 2012).

Bressiani *et al.* (2016), propõem, primeiramente uma etapa de calibração manual para avaliar os principais componentes do balanço hídrico e o comportamento dos principais processos, analisando a simulação com *soft data* e *hard data*. Segundo os autores supracitados, esta avaliação inicial dos principais componentes do balanço hídrico é um passo importante na calibração, pois seu objetivo é identificar se há problemas importantes ou deturpações que podem levar à necessidade de alterar métodos ou ajustar os dados de entrada para diferentes fontes ou melhorar a resolução dos dados de entrada. *Soft data* refere-se a dados obtidos por meio da experiência do pesquisador ou da literatura científica e aproximados para área de estudo, sendo muito comuns valores médios e qualitativos. Já o *hard data* refere-se a dados observados, como por exemplo, dados de vazão (Bressiani, 2016; Silva, 2010).

Após a análise de sensibilidade e calibração dos parâmetros do modelo, deve-se realizar a validação do mesmo. Esta etapa consiste na simulação do modelo utilizando os parâmetros calibrados, a fim de verificar se os dados de saída do modelo se aproximam dos valores observados em campo (Mauri *et al.*, 2020). De acordo com Bressiani (2016) e Nguyen *et al.* (2022), a validação é a verificação da força do modelo calibrado por meio de estatísticas e gráficos, em que se mantém o mesmo conjunto de parâmetros calibrados e os resultados simulados são comparados com dados de um período de tempo diferente. Existem diferentes funções objetivo recomendadas pela literatura científica para avaliar a eficiência da calibração e validação das

simulações de modelos hidrológicos. A escolha de cada função depende da finalidade do estudo, direcionando a calibração do modelo para otimizar a simulação de vazões ou produção de sedimentos. As mais utilizadas são: NSE (Nash-Sutcliffe Efficiency – Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe);  $R^2$  (Coefficient of Determination – Coeficiente de Determinação), PBIAS (Percent Bias – Percentual de Tendência); RSR (RMSE-observations Standard deviation Ratio – Razão entre o erro padrão médio e o desvio padrão das observações); MNS (Modified Nash-Sutcliffe Efficiency – Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe Modificado); KGE (Kling–Gupta Efficiency – Coeficiente de Eficiência Kling–Gupta); entre outras (Daggupati et al., 2015); (Dechmi; Skhiri; Isidoro, 2021).

Duru, Arabi e Wohl (2018), avaliaram o modelo SWAT+ e geraram um mapa de erosão para a bacia de Ankara em que utilizaram treze anos de dados de vazão em escala diária e mensal. Os autores separaram a série histórica em duas. Uma com sete anos para a calibração e outra com dois anos para a validação do modelo. Para avaliar a precisão dos resultados da simulação no SWAT+, os autores utilizaram medidas estatísticas como o coeficiente de Nash Sutcliffe (NSE), erro relativo (ER) e  $R^2$  (coeficiente de determinação). Como resultado da aplicabilidade do modelo em prever a perda de solo em Ankara na Turquia, os autores consideram o modelo satisfatório, podendo ser usado como uma ferramenta na tomada de decisões para o planejamento de recursos hídricos em uma bacia com características semelhantes.

Nos estudos de Thavhana, Savage e Moeletsi (2018), os autores utilizaram o SWAT+ na interface do QGis (QSWAT) para simular o escoamento superficial e os processos erosivos na bacia do rio Luvuvhu, África do Sul e para isso os autores utilizaram um período de 33 anos, compreendendo o período de 1983 a 2015. A análise de sensibilidade, calibração e validação foram conduzidas usando o algoritmo de ajuste de incerteza sequencial (SUFI-2) através de sua interface com calibração SWAT e procedimento de incerteza (SWAT-CUP). O processo de calibração foi conduzido para o período de 1986 a 2005, enquanto o processo de validação foi de 2006 a 2015. Os autores utilizaram os seis parâmetros de eficiência para avaliar o modelo, a saber: coeficiente de determinação, índice de Nash Sutcliffe, erro quadrático médio, razão de desvio padrão das observações, fator de probabilidade e fator de coeficiente de correlação. O algoritmo SUFI-2 por meio da interface com o

SWAT-CUP foi capaz de capturar o comportamento do modelo, com resultados de calibração mostrando-se adequados.

Tsuchiya, Kato e Jeong (2016), utilizaram o modelo SWAT para avaliar a sustentabilidade do cultivo de arroz em uma bacia hidrográfica no Japão através da estimativa da qualidade da água e das taxas de infiltração do solo. O modelo SWAT-CUP foi utilizado para calibrar e validar o modelo, porém os resultados encontrados pelos autores após a calibração e validação do método não se mostraram significativos. Para os autores a carência de dados de qualidade, explica os resultados insatisfatórios encontrados após a calibração do modelo.

Sendo assim, o uso do modelo SWAT+ para modelar diversos processos ambientais, têm se mostrado eficiente após a calibração e validação do modelo. Porém, torna-se necessário que os dados de entrada, bem como a quantidade e qualidade destes dados sejam suficientes para a obtenção de resultados satisfatórios na avaliação da qualidade da modelagem (Kateb et al., 2020; Thavhana; Savage; Moeletsi, 2018; Triana et al., 2019).

## 4 CAPÍTULO 1 – SOFTWARES E ALGORITMOS PARA CALIBRAÇÃO DO MODELO *SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL*: UMA SÍNTESE BASEADA EM MAPEAMENTO CIENTÍFICO E REVISÃO SISTEMÁTICA

Uma versão adaptada deste capítulo está em processo de revisão na *Journal of Hydrology*

### 4.1 Introdução

Nos últimos anos, os avanços nos modelos hidrológicos baseados em processos têm sido significativos, marcando um progresso notável na abordagem dos complexos desafios enfrentados pelos sistemas de recursos hídricos (Koltsida; Kallioras, 2022; Koo et al., 2020; Mohammadi; Vazifekhhah; Duan, 2024). Dentre esses modelos, o *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) se destaca por ser um modelo de base física, com capacidade de simular bacias hidrográficas de tamanhos variados e complexas, além de simular vários processos e cenários, fornecendo subsídios para decisões relacionadas ao uso e conservação da água (Abbaspour et al., 2015; Nguyen et al., 2022). O modelo foi desenvolvido em 1996 nos EUA pelo Agricultural Research Service e pela Texas A&M University para prognosticar o impacto das práticas de gestão do solo nos recursos hídricos e a produção de sedimentos em bacias hidrográficas, com diferentes tipos de solo, uso e cobertura, características de terreno e diferentes práticas de manejo, após um longo período (Neitsch et al., 2011).

O uso eficiente de modelos hidrológicos, como o SWAT, se torna uma ferramenta importante para promover um manejo sustentável dos recursos hídricos. No entanto, a eficácia desses modelos depende diretamente da precisão da calibração e validação. Em muitas regiões do mundo como na África (Akoko et al., 2021), Brasil (Brighenti; Bonumá; Chaffe, 2016) e no Sudeste Asiático (Tan et al., 2021), a falta de dados observados confiáveis torna a calibração dos modelos uma tarefa complexa e incerta (Aawar; Khare, 2020).

A estimativa precisa dos componentes do balanço hídrico em escala da bacia hidrográfica é fundamental, pois a partir dela são tomadas decisões importantes no planejamento e gestão dos recursos hídricos, como por exemplo, prever a ocorrência

de eventos hidrológicos extremos, como enchentes e secas, sob diferentes cenários climáticos (Kumar; Singh; Gaurav, 2023) e avaliar a eficácia de diferentes práticas de conservação da água, como o plantio direto e a construção de terraços, na redução da erosão do solo e no aumento da recarga de aquíferos (Cuceloglu; Abbaspour; Ozturk, 2017; Kumarasamy; Belmont, 2018). Por isso, a disponibilidade de um modelo hidrológico confiável e que apresente uma interface acessível continua sendo uma questão relevante para muitos pesquisadores e usuários finais, como engenheiros e gestores ambientais (Mohammadi; Vazifehkhah; Duan, 2024). Esses profissionais, muitas vezes, não têm familiaridade com programação ou estatísticas avançadas, e a falta de interfaces amigáveis e suporte ao usuário pode dificultar a aplicação correta dos modelos, limitando sua utilização prática. Decisões baseadas em modelos mal calibrados podem resultar em investimentos inadequados em infraestrutura hídrica, acarretando perdas financeiras substanciais (Daggupati et al., 2015; Hughes; Lawrence, 2024).

O SWAT sendo um modelo de base física e distribuído, requer uma quantidade substancial de dados de entrada, além de possuir muitos parâmetros que precisam ser calibrados (Arnold et al., 2012). A calibração desse modelo envolve ajustar os parâmetros como os relacionados ao escoamento superficial, infiltração de água no solo e transporte de sedimentos, para que se alinhem com os dados observados, um processo que pode ser extremamente laborioso e demorado (Kikoyo; Oker, 2023).

Recentemente, tem havido uma tendência no desenvolvimento de modelos hidrológicos, tais como APEX (Agricultural Policy/Environmental Extender) (Yen et al., 2019), M-LASH (Lavras Simulation of Hydrology) (Vargas et al., 2023), MGB-IPH (Modelo de Grandes Bacias do Instituto de Pesquisas Hidráulicas) (Pontes et al., 2017) e o SWAT+ (versão atualizada do SWAT) (Bieger et al., 2017), levando em consideração a disponibilidade de hardware avançado e maior poder de computação (Her; Chaubey, 2015; Lin et al., 2024; Shivhare et al., 2018). Isso abriu novas oportunidades para melhorar a precisão e a eficiência dos modelos, como o SWAT, em suas aplicações práticas. Porém, ainda não há disponível um mapeamento científico sobre as ferramentas computacionais usadas para calibrar o modelo SWAT, tampouco uma síntese sobre a evolução destes softwares e algoritmos, identificando tendências e lacunas na literatura científica ao longo do tempo.

Aqui, utilizamos uma abordagem cienciométrica para mapear e quantificar a evolução do conhecimento científico e tecnológico relacionado as ferramentas computacionais empregadas para análise de sensibilidade, calibração, validação e análise de incerteza do modelo SWAT nos artigos científicos mais relevantes sobre o tema. Ao analisar a produção científica, podemos mapear as principais tendências, identificar os pesquisadores e instituições mais influentes, descobrir quais temas estão em alta e quais áreas ainda carecem de mais estudos, abrindo caminho para novas pesquisas e colaborações.

O resultado deste mapeamento científico, permitirá identificar as áreas que mais precisam de atenção e direcionar os esforços de pesquisa para onde eles farão mais diferença. Isso é importante tanto para os pesquisadores, que poderão escolher temas mais relevantes para suas pesquisas, quanto para os gestores públicos, que poderão tomar decisões mais assertivas sobre o investimento em novas tecnologias e políticas para a gestão da água. Aqui buscamos responder as seguintes perguntas: i) Como evoluíram os estudos mais relevantes sobre softwares e algoritmos utilizados para a análise de sensibilidade, calibração, validação e análise de incertezas do modelo SWAT, ii) Softwares gratuitos como R-SWAT e o SWAT Toolbox são os mais utilizados nos últimos cinco anos para avaliar o desempenho do modelo SWAT; iii) Qual o tamanho das bacias hidrográficas que foram modeladas com o SWAT nos artigos selecionados, iv) Quais as revistas são mais relevantes para a temática, v) Qual o período adotado para a calibração e validação do modelo SWAT?

Com a quantificação da produção científica através da abordagem cienciométrica e revisão sistemática dos artigos mais relevantes, objetivamos : i) identificar os principais autores, revistas científicas, as publicações científicas, bem como os períodos adotados para calibração e validação e o tamanho das bacias hidrográficas nos estudos relacionados ao uso de softwares e algoritmos para análise de sensibilidade, calibração, validação e incertezas no modelo SWAT; ii) Examinar as tendências na evolução dos estudos sobre as ferramentas computacionais utilizadas pelo modelo SWAT, destacando os avanços tecnológicos e metodológicos mais significativos e iii) Identificar lacunas na literatura existente sobre o uso de softwares e algoritmos para o modelo SWAT, apontando áreas que necessitam de mais investigação e desenvolvimento futuro.

## 4.2 Materiais e Métodos

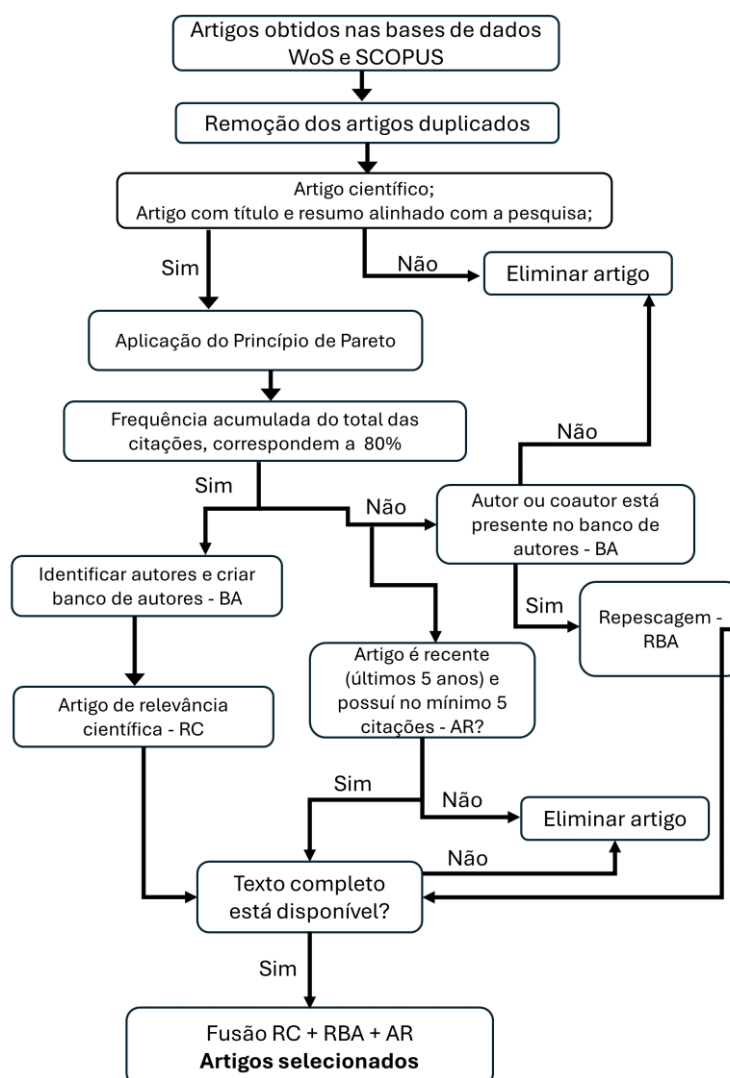
### 4.2.1 ESTRATÉGIA DE PESQUISA E ELEGIBILIDADE

Para obter as publicações sobre os softwares e algoritmos utilizados para a calibração e validação do modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) buscou-se nas bases de dados *Scopus* (<https://www.scopus.com/>) e *Web of Science - WoS* ([http://apps.webof+/\\*knowledge.com](http://apps.webof+/*knowledge.com)). Para recuperar os artigos científicos no tema foi feita uma busca com as seguintes expressões: (("calibrat\*" OR "validat\*" OR "Sensitivity and uncertainty analysis") AND ("SWAT+" OR "SWAT plus" OR "SWAT" OR "SWAT model" OR "*Soil and Water Assessment Tool*") AND ("multi-gauge calibration" OR "SWAT-CUP" OR "SWAT Toolbox" OR "IPEAT\*" OR "Integrated Parameter Estimation and Uncertainty Analysis Tool" OR "R-SWAT " OR "RSWAT" OR "genetic algorithm" OR "SUFI" OR "Sequential Uncertainty Fitting" OR "SWAT CUP" OR "Toolbox" OR "GLUE" OR "Generalised likelihood uncertainty estimation" OR "Latin Hypercube Sampling" OR "LHS")). Foi considerado desde a primeira publicação, portanto, de 2005 até abril de 2024. Foi realizado o download dos metadados dos artigos encontrados em cada base de dados e realizada a remoção de artigos duplicados através do pacote Bibliometrix 2.2.1 (Aria; Cuccurullo, 2017) implementado no programa R versão 4.4.0 (R Core Team, 2024). Após, os arquivos foram inspecionados visualmente e foram excluídos artigos de revisão, artigos comentados, versões anteriores de estudos previamente corrigidos, artigos de conferências e congressos, capítulos de livros e livros e artigos que não correspondiam ao escopo deste estudo.

Para identificar os artigos que apresentam maior reconhecimento científico, segundo critério de citação, utilizou-se o Princípio de Pareto. Para tanto, e, aplicado a esse estudo refere-se aos 20% dos artigos que são responsáveis por 80% das citações sobre a temática em estudo (Koch, 2011; Lacerda; Ensslin; Ensslin, 2012; Salgado; Martins, 2020). Posteriormente, criou-se um banco de dados dos autores que não corresponderam ao percentual de 20% dos artigos mais relevantes e caso houvesse um autor presente neste banco de dados e que foram autores principais ou correspondentes dos artigos relevantes, estes artigos foram "repscados". Foram selecionados também os artigos não reconhecidos por Pareto, mas que foram

publicados nos últimos 5 anos e que apresentavam no mínimo 5 citações e foram selecionados somente os artigos com texto completo disponível para download nas revistas (Figura 1)

Figura 1 - Fluxograma de identificação e seleção dos artigos para a avaliação cienciométrica do objeto de estudo e revisão sistemática. RC – Relevância Científica. BA – Banco de Autores. AR – Artigo Recente. RBA – Repescagem Banco de Autores. Diagrama adaptado de PRISMA2020 (Page et al., 2022).



#### 4.2.2 AVALIAÇÃO CIENCIOMÉTRICA E REVISÃO SISTEMÁTICA

O mapeamento científico e as análises estatísticas foram conduzidas no pacote Bibliometrix 2.2.1 (Aria; Cuccurullo, 2017), implementado em R 4.4.0 (R Core Team, 2024). Para avaliar a produtividade dos 25 autores mais produtivos, obtivemos o número de artigos por autor e ao longo do tempo e o índice h (Hirsch, 2007), bem

como o número total de citações de cada artigo. Para investigar a produtividade científica, utilizando a frequência de publicação dos autores aplicou-se a lei de Lotka (Lotka, 1926).

Para analisar a estrutura da produção científica referente aos estudos sobre os softwares e algoritmos utilizados para análise de sensibilidade, calibração, validação e análise de incertezas do modelo SWAT, foi gerada uma análise de rede colaborativa entre autores, utilizando o algoritmo de agrupamento de Waltrap normalizado pela distância de Jaccard com o Bibliometrix (Aria; Cuccurullo, 2017). Os 50 autores com maiores valores de centralidade de intermediação e pelo menos uma vantagem entre os autores foi escolhida para participar da rede. Para identificar as principais instituições, revista científicas e países, adotou-se as 10 instituições e países e as 20 revistas mais relevantes.

O mapa temático, uma ferramenta poderosa para identificar tendências de pesquisa, utiliza uma análise de rede de copalavras e agrupamento. Ao aplicar a análise de copalavras para mapear a ciência, obtêm-se grupos de palavras-chave interconectadas. Esses agrupamentos ou clusters formam os temas ou subtemas da pesquisa. Assim, um campo de pesquisa pode ser visualizado como um conjunto de temas, organizados em um espaço bidimensional (Cobo *et al.*, 2011). Para tal, utilizou-se o algoritmo proposto por (Cobo *et al.*, 2011) para o diagrama temático de (Callon; Courtial; Laville, 1991). A ocorrência e o agrupamentos das palavras-chave em quadrantes no espaço bidimensional, ocorre com base na centralidade e densidade. A centralidade é a medida da relevância do tema e a densidade é medida do desenvolvimento do tema (Callon; Courtial; Laville, 1991).

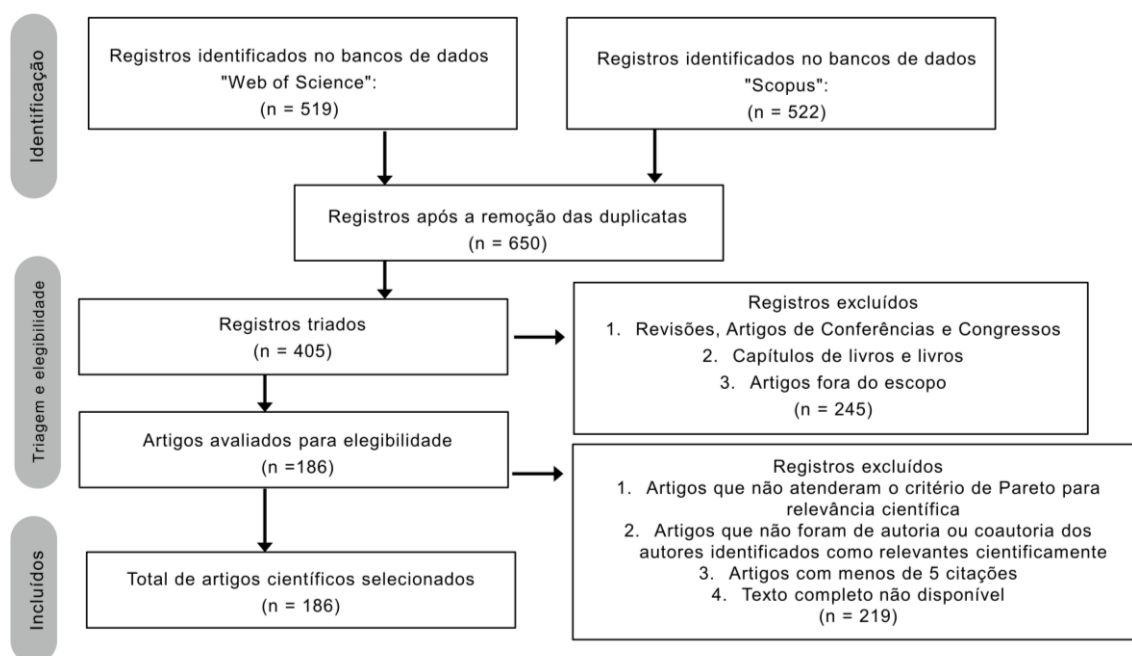
Para a identificação dos principais campos de aplicação do modelo SWAT, o tamanho preferencial da área de estudo, os principais softwares, algoritmos e interfaces usados na modelagem hidrológica com o SWAT, assim como para realizar o diagnóstico do que se conhece sobre a temática abordada, assim como para auxiliar a responder as questões levantadas por este estudo, utilizou-se da revisão sistemática seguindo o protocolo PRISMA (Principais Itens para Relatar Revisões Sistemáticas e Meta-análises) (Page *et al.*, 2022).

## 4.3 Resultados e Discussão

### 4.3.1 AVALIAÇÃO CIENCIOMÉTRICA

O mapeamento científico dos estudos sobre os softwares e algoritmos utilizados para a análise de sensibilidade, calibração, validação e análise de incertezas do modelo SWAT identificou um total de 522 estudos na SCOPUS e 519 na WoS, após a exclusão dos artigos duplicados, recuperou-se um total de 650 artigos. Após os processos de triagem e elegibilidade foram obtidos um total de 186 (Apêndice A) artigos científicos elegíveis para a abordagem cientiométrica e revisão sistemática, conforme o processo demonstrado na Figura 2.

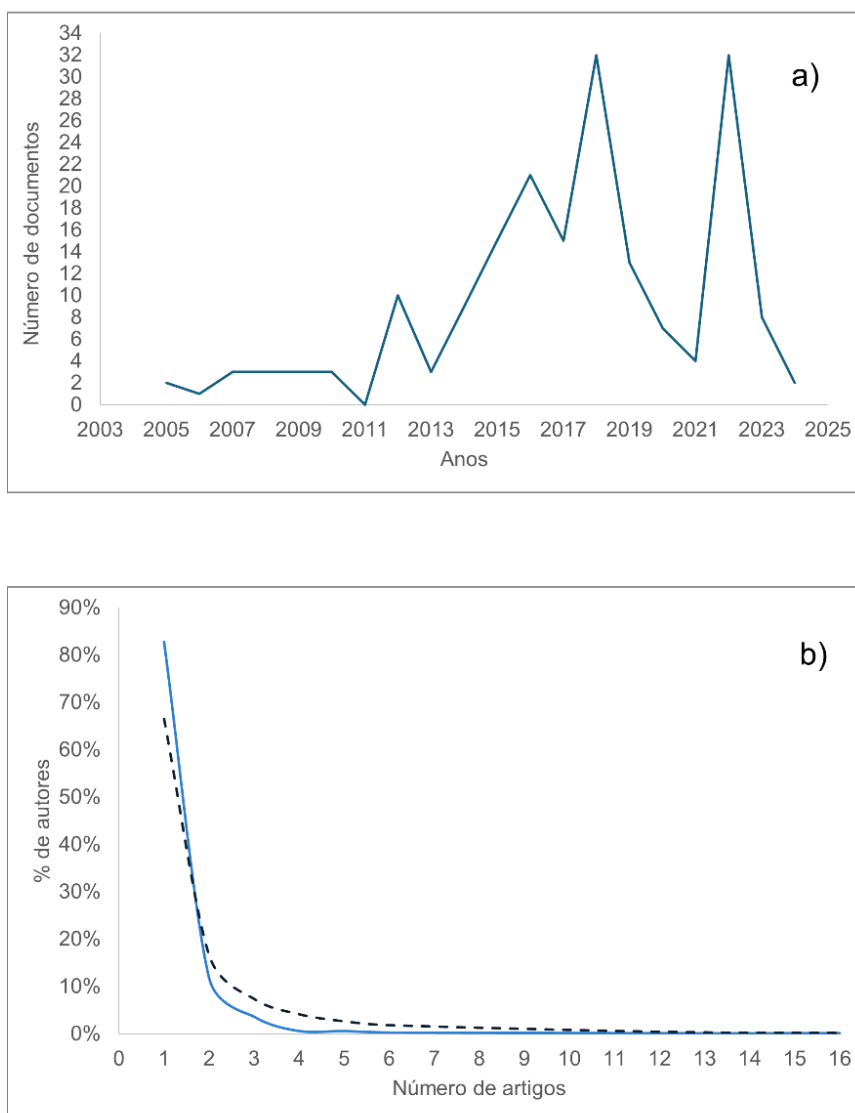
Figura 2 - Fluxograma com resultados da seleção dos artigos para a avaliação cientiométrica do objeto de estudo e a revisão sistemática, onde “n” é o número de artigos. Diagrama adaptado de PRISMA2020 (Page et al., 2022).



Com base no banco de artigos estruturado, foram identificadas 73 revistas científicas, 930 palavras-chave e 662 autores. O primeiro artigo encontrado, foi publicado em 2005. Houve dois momentos em que o número de artigos publicados alcançou 32 documentos (anos de 2018 e 2022), sendo que no ano de 2021 houve uma brusca queda no número de artigos publicados sobre a temática de softwares e

algoritmos e SWAT (Figura 3). Este fato pode ter sido causado pelo impacto da Pandemia do Covid-19. (Gao et al., 2021), investigaram os impactos de longo prazo da pandemia do COVID-19 sobre os cientistas, com base em duas pesquisas realizadas entre abril de 2020 e janeiro de 2021 e verificaram que houve uma queda significativa na iniciação de novos projetos de pesquisa durante este período, além de destacarem a importância das interações presenciais para a formação de novas ideias e colaborações científicas.

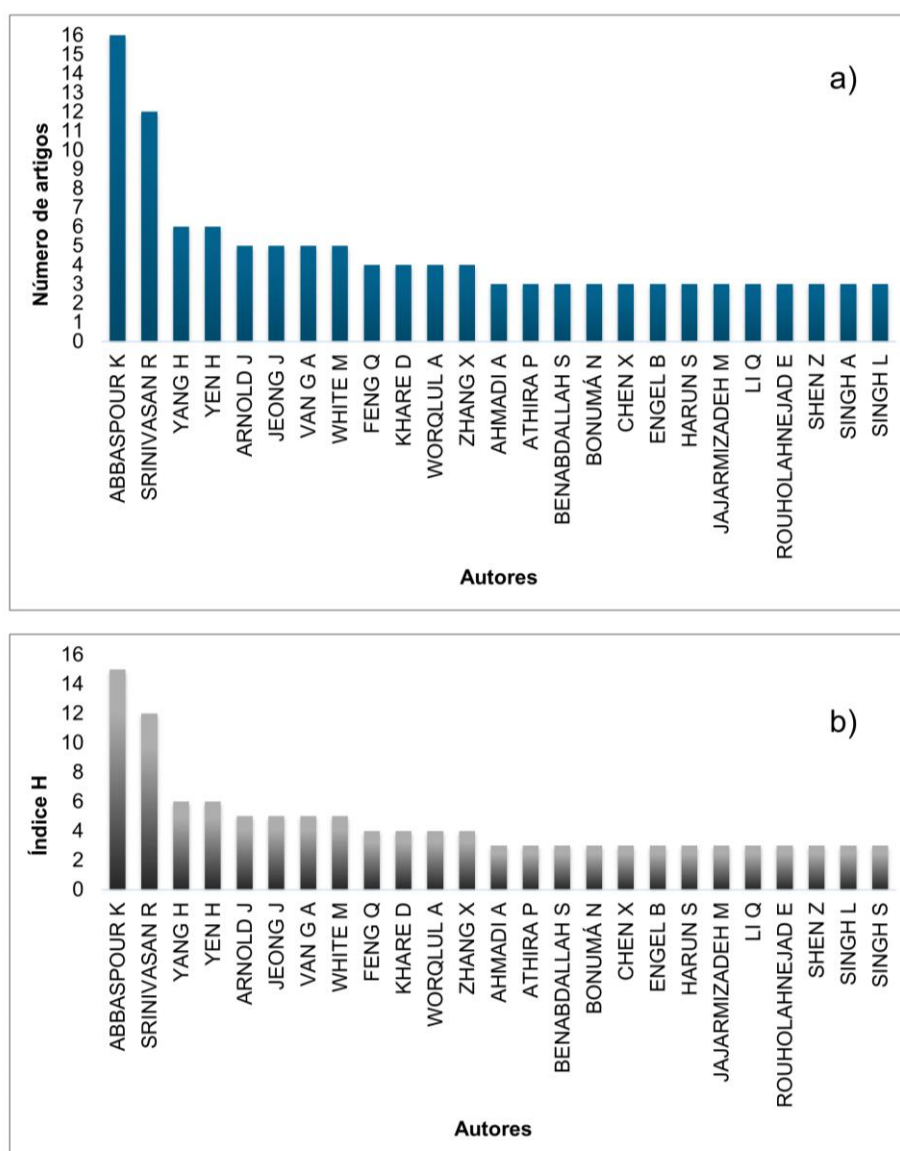
Figura 3 - Produção científica sobre ferramentas computacionais na modelagem hidrológica com o SWAT. (a) Número de artigos científicos publicados por ano e b) Produtividade dos autores através da Lei de Lotka linha tracejada é o esperado em termos de produção e linha contínua é observado.



O número de artigos por autor foi considerado baixo (0,28). A produtividade dos autores segue a lei de Lotka, sugerindo que a maior parte do conhecimento científico sobre os softwares e algoritmos usados para calibração do SWAT são produzidos por poucos pesquisadores. Verificou-se que 83% dos autores produziram apenas um artigo e 12% produziram até dois artigos, isso sugere que a maioria dos pesquisadores que publicam sobre algoritmos e softwares para calibração do modelo SWAT, não são pesquisadores que tradicionalmente publicam sobre o assunto, apresentando características de publicações esporádicas (Figura 3).

Os 25 autores mais produtivos com base no número de publicações foram Abbaspour K (n=16), Srinivasan R (n=12), Yang H e Yen H (n=6), Arnold J; Jeong J; Van GA e White M com 5 artigos cada, Feng Q; Khare D; Worqlul A e Zhang X (n=4) e os demais autores com 3 artigos cada (Figura 4). De acordo com o índice h, os autores mais proeminentes e relevantes foram Abbaspour K(n=15), Srinivasan R (n=12), Yang H e Yen H (n=6), Arnold J; Jeong J; Van GA e White M com 5 artigos cada, Feng Q; Khare D; Worqlul A e Zhang X (n=4) e os demais autores com 3 artigos cada (Figura 4).

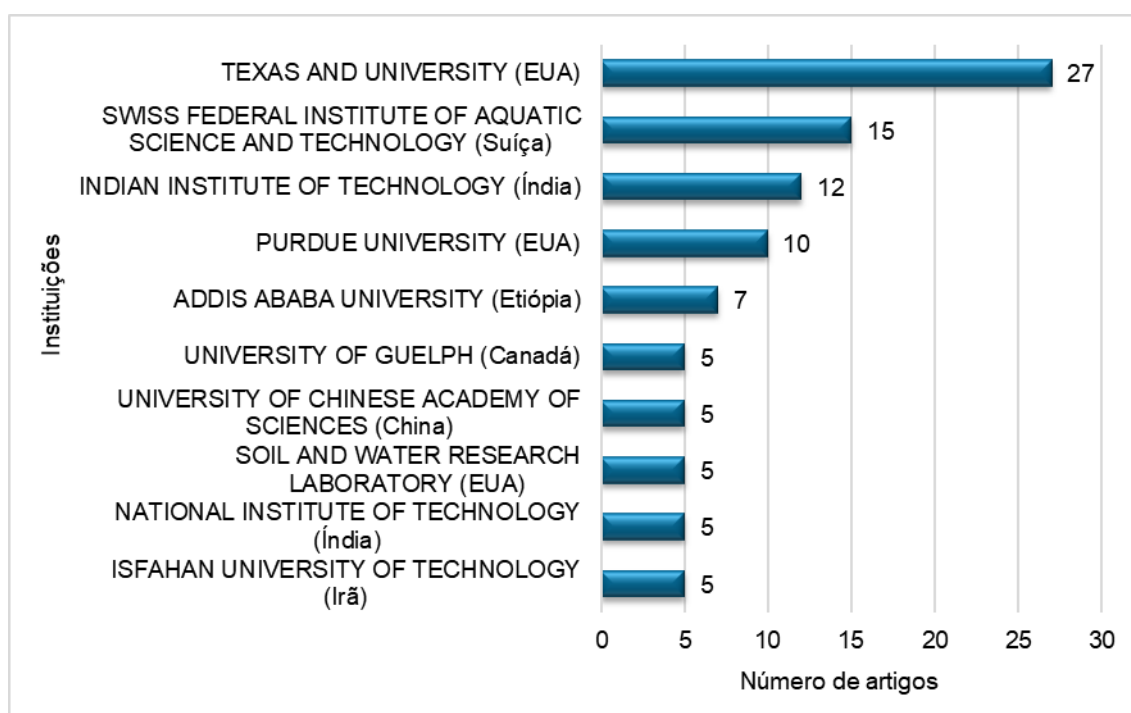
Figura 4 - Produtividade dos autores sobre os softwares e algoritmos para calibração com o SWAT. a) Distribuição do número de artigos considerando os 25 autores mais produtivos; (b) Impacto da produção científica considerando o índice h para cada um dos 25 autores principais.



A abordagem cienciométrica revelou uma alta taxa de citações para os artigos publicados por Abbaspour K, Srinivasan R, Yang H, Yen H e Arnold J, pesquisadores diretamente ligados ao desenvolvimento do modelo SWAT e do software SWAT-CUP. Em média, cada artigo desses autores recebeu um número expressivo de citações, indicando a relevância de suas contribuições para o campo.

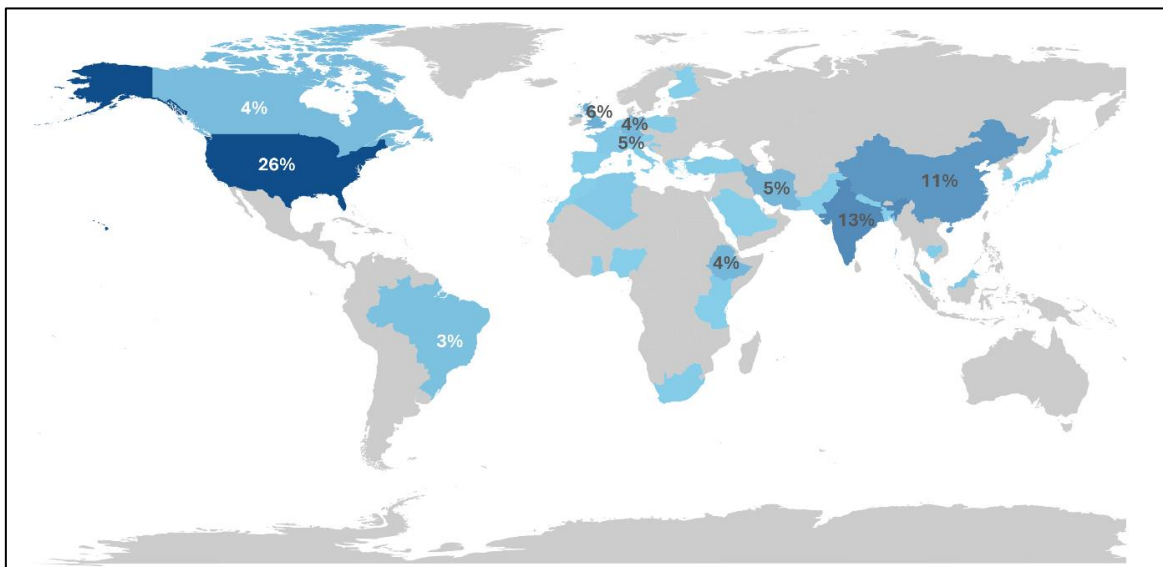
As instituições afiliadas a esses pesquisadores, como a Texas A&M University e o Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (Figura 5), destacam-se como centros de excelência no desenvolvimento e aprimoramento contínuo das ferramentas para calibração do modelo SWAT. O Indian Institute of Technology assim como a Purdue University são instituições parceiras da Texas A&M University, pois apresentam um vínculo com o professor Srinivasan R, este foi egresso destas instituições (<https://ssl.tamu.edu/people/r-srinivasan/>). Esses resultados confirmam a importância dessas instituições na evolução dos algoritmos e softwares utilizados na calibração do modelo, impulsionando assim o avanço da pesquisa em modelagem hidrológica.

Figura 5 - As dez principais instituições que publicaram mais artigos relacionados a algoritmos e softwares para SWAT.



A Figura 6 ilustra a distribuição geográfica de publicações sobre o uso de softwares e algoritmos para a calibração do modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) em diversos países.

Figura 6 - Países mais produtivos quanto ao tema abordado. Países sem referência de valor de produtividade, considerar <2%.



A Figura 6 revela que o SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) é utilizado de maneira desigual ao redor do mundo. Alguns países, principalmente os Estados Unidos, mostram uma participação significativa na pesquisa relacionada ao SWAT, enquanto outras regiões permanecem praticamente sem publicações sobre softwares e algoritmos para calibração do modelo. De fato, 26% das publicações são originárias dos Estados Unidos, seguidos pela Índia com 13%, China com 11%. Países europeus como Reino Unido e Suíça também têm uma presença de 6% e 5% respectivamente, assim como o Canadá e a Alemanha, ambos com cerca de 4% Etiópia com 4% e Iran com 5%, o Brasil aparece com 3% das publicações relacionadas ao tema.

A pesquisa realizada por (Wang et al., 2016), intitulada “A bibliometric analysis for the research on river water quality assessment and simulation during 2000–2014” demonstrou que os Estados Unidos seguido pela China, Reino Unido e Canadá eram os países que mais publicavam sobre simulação da qualidade da água dos rios utilizando o modelo SWAT. A Índia aparecia em décima posição. Em nossa pesquisa, verifica-se que a Índia que enfrenta problemas crescentes com a água devido às mudanças climáticas, popularizou a modelagem com o SWAT (Dubey et al., 2023), e

vem se destacando frente à China, uma das grandes potências científicas da atualidade em diversos segmentos (Wagner; Simon, 2023). No entanto, uma quantidade significativa de regiões, incluindo a América do Sul (exceto o Brasil), grande parte da África, Ásia Central e Europa Oriental, não possui publicações expressivas sobre softwares e algoritmos para calibração do modelo, indicando uma lacuna na pesquisa que pode ter diversas implicações.

Primeiramente, um fator crítico para essa disparidade pode ser o acesso limitado a recursos. Em muitas das regiões que aparecem em cinza no mapa, a infraestrutura tecnológica pode ser inadequada para suportar as complexas demandas de modelagem hidrológica, que exige computadores poderosos e dados extensos para a calibração e execução do SWAT (Baninajar; Sarang; Karbassi, 2023; Taia et al., 2023). Além disso, a falta de financiamento específico para a pesquisa científica nessas áreas pode limitar a capacidade das instituições de pesquisa locais de investirem no uso de modelos avançados como o SWAT (Akoko et al., 2021). Outro aspecto importante é a capacitação e o conhecimento técnico. Em algumas dessas regiões, a educação e os programas de treinamento relacionados à modelagem hidrológica podem ser insuficientes, resultando em uma escassez de profissionais qualificados para utilizar e desenvolver pesquisas com o SWAT (Janjić; Tadić, 2023).

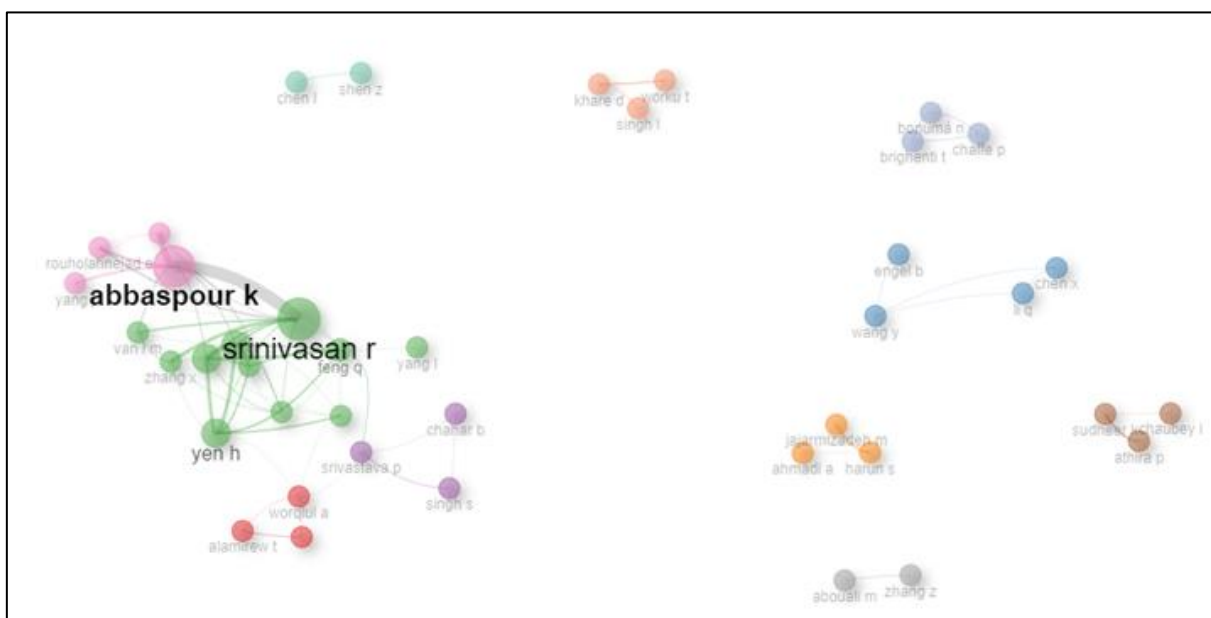
As escolhas de modelos também podem ser influenciadas por preferências locais e alternativas tecnológicas. É possível que em algumas regiões os pesquisadores optem por modelos hidrológicos alternativos que sejam mais adequados às suas condições locais, reduzindo, assim, o foco no SWAT (Baninajar; Sarang; Karbassi, 2023). Fatores geopolíticos e de governança desempenham um importante papel no desenvolvimento científico, pois, em algumas regiões, a instabilidade política e a falta de políticas governamentais favoráveis podem prejudicar o financiamento e a continuidade de projetos de pesquisa, dificultando o crescimento de uma comunidade científica que poderia tirar proveito do uso do SWAT (Hou; Pan; Zhu, 2021).

Essas lacunas de pesquisa não são apenas estatísticas; elas têm consequências reais para a gestão dos recursos hídricos. A falta de estudos sobre o modelo SWAT em muitas regiões do mundo limita a compreensão dos processos hidrológicos locais, comprometendo a eficiência da gestão dos recursos hídricos, o que pode levar à tomada de decisões inadequadas, exacerbando problemas como a

escassez hídrica e a poluição (Aloui et al., 2023). Para mitigar essas lacunas, é essencial promover colaborações globais que incentivem parcerias entre instituições de pesquisa de diferentes países, facilitando a troca de conhecimentos e o acesso a recursos. Investir em programas de formação e capacitação pode ajudar a desenvolver o conhecimento técnico necessário para o desenvolvimento de ferramentas computacionais para calibração e para aplicação do SWAT, enquanto políticas de financiamento específicas podem apoiar projetos que abordem as necessidades locais (Asgari et al., 2022; Dubey et al., 2023).

Foram encontrados 11 grupos de pesquisa distribuídos na rede de colaboração entre os autores (Figura 7). O cluster rosa (1) e verde (2) apresentaram alta colaboração intergrupo, destacando Srinivan e Abbaspour, mas também há alta colaboração intragrupo, como por exemplo Srinivanan, Yen, Feng e Arnold no cluster verde e Abbaspour, Yang e Rouholahnejad no cluster rosa.

Figura 7 - Rede de colaboração entre autores que publicaram artigos científicos contendo informações sobre os softwares e algoritmos utilizados para a calibração, validação do modelo SWAT.

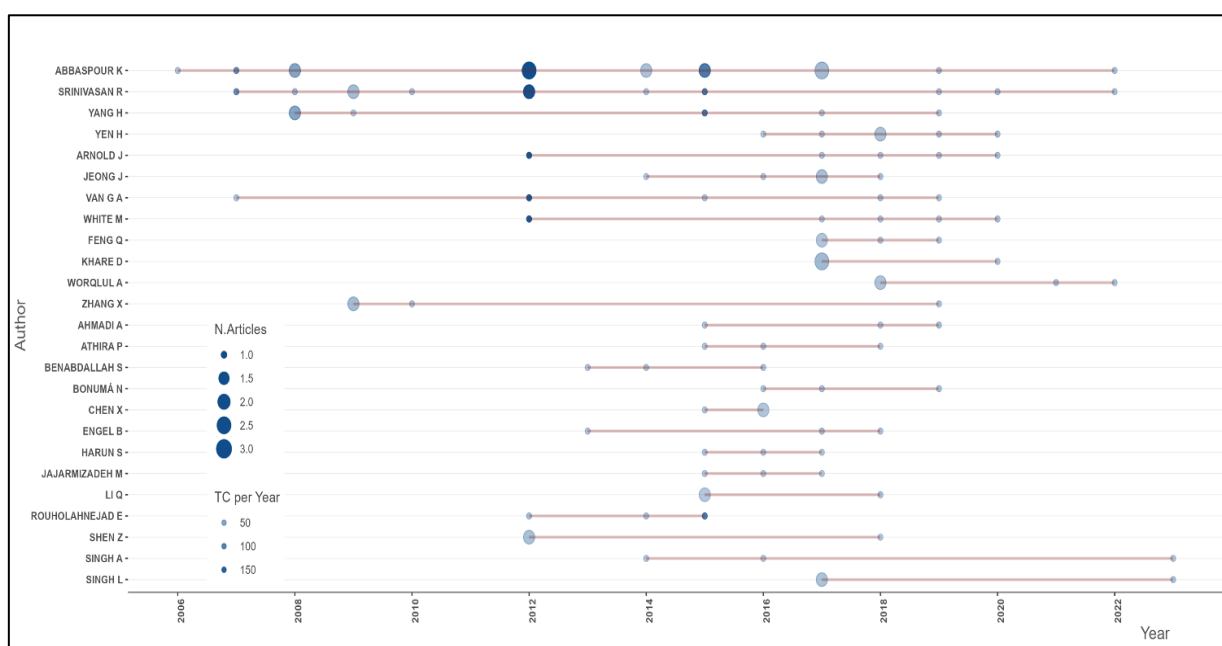


Verifica-se ainda que os autores presentes no cluster verde podem ser considerados os mais regulares e influentes dentro da temática estudada, pois conectam-se a 3 grupos, enquanto o grupo vermelho e roxo se conecta com 2 grupos cada um e o rosa apenas com um grupo. O cluster roxo e vermelho apresentam uma pequena colaboração com o grupo principal (verde). Os demais clusters são pequenos

grupos de pesquisa, constituídos por poucos pesquisadores (entre 2 ou três) e que não colaboram entre si. Ou seja, para o conjunto de dados avaliado, percebe-se estes pesquisadores que tecnicamente são os mais citados e que tem maior impacto, pouco colaboram entre si. Os que mais colaboram são os que possuem um grupo estabelecido (cluster verde e rosa).

De acordo com a evolução temporal das publicações por autor, verificou-se que 5 dos 25 autores mais produtivos, tiveram seus trabalhos publicados há mais de 12 anos (Figura 8).

Figura 8 - Produtividade dos 25 principais autores ao longo do tempo, entre 2005 e 2024.



Abbaspour K foi o pesquisador pioneiro no assunto seguido por Srinivasan R e Van GA. Abbaspour K é o autor que apresenta maior cronologia e constância na publicação, inclusive com um número mais alto de publicações anuais sobre o SWAT no ano de 2012 e 2017, com 3 artigos no ano. O artigo intitulado “SWAT model use calibration and validation” em que era coautor de Arnold, J., obteve uma média de citações por ano de aproximadamente 165 citações. Srinivasan R e Abbaspour K foram coautores em sete trabalhos ao longo do período analisado, em que, além do artigo de 2012, o artigo “A continental scale hydrology and water quality model for Europe calibration and uncertainty of a high resolution large scale SWAT model” publicado no ano de 2015 teve em média 113 citações por ano. Srinivasan representa

a Texas A & M e Abbaspour o Swiss Federal Institute for Aquatic Science and Technology. Yang H teve 2 publicações em 2008 e teve em média 50 citações. Após este período, em 2015, o autor teve um artigo que teve mais de 100 citações. Com exceção de Abbaspour K e Srinivasan R, Yang H e Vang G que são os autores de maior cronologia nas publicações, publicaram seus estudos em intervalos maiores ou igual a três anos, com exceção dos anos de 2017 a 2019 (Figura 8).

Os 25 artigos mais citados foram publicados entre 2005 e 2019, com número total de citações variando de 2151 – “Arnold *et al.*, 2012” - a 87 – “Talebizadeh *et al.*, 2010” (Tabela 1). A evolução das publicações ao longo do tempo pode ser dividida em três períodos: 2005 a 2010, 2011 a 2015, de 2016 a 2019. O primeiro período de 5 anos dos estudos foi marcado por um pequeno número de publicações anuais. O ano de 2007 destaca-se com a publicação de um artigo de grande impacto com 1490 citações *"Modelling Hydrology and Water Quality in the Prealpine-Alpine Thur Watershed Using SWAT"* (Abbaspour *et al.*, 2007).

O número de publicações durante esse período foi modesto em comparação com anos posteriores. Em 2006, foi publicado o artigo “Calibration and uncertainty issues of a hydrological model (SWAT) applied to West Africa”, (Schuol; Abbaspour, 2006) que recebeu 102 citações. O segundo período de 2011 a 2015, houve um aumento acelerado no número de publicações. O trabalho intitulado "SWAT Model Use Calibration and Validation" (Arnold *et al.*, 2012), foi o mais citado, com um total de 2151 citações. Em 2015, o artigo “A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model” (Abbaspour *et al.*, 2015), também foi impactante, acumulando 1132 citações.

Por fim, o terceiro período de 2016 a 2019 pode ser considerado como um período de consolidação e diversificação na produção científica, com diversos artigos focando em análises de incertezas e aplicações do modelo SWAT em diferentes contextos e regiões. A exemplo tem-se os artigos “Streamflow and Sediment Yield Prediction for Watershed Prioritization in the Upper Blue Nile River Basin, Ethiopia” (Ayele *et al.*, 2017), que recebeu 117 citações, “Evaluating the role of evapotranspiration remote sensing data in improving hydrological modeling predictability” (Herman *et al.*, 2018), com 110 citações, “Techniques for calibration and validation of SWAT model in data scarce arid and semi-arid catchments in South Africa” (Mengistu; van Rensburg; Woyessa, 2019) com 89 citações.

Tabela 1 - Os 25 artigos mais citados sobre o conhecimento científico relacionado a calibração do modelo segundo as bases de dados SCOPUS e WoS.

Primeiro autor	DOI	Revista	Ano de publicação	Total de citações	Total de citações por ano
ARNOLD JG	Sem DOI	ASABE	2012	2151	165,5
ABBASPOUR KC	10.1016/j.jhydrol.2006.09.014	Journal of Hydrology	2007	1490	82,8
ABBASPOUR KC	10.1016/j.jhydrol.2015.03.027	Journal of Hydrology	2015	1132	113,2
YANG J	10.1016/j.jhydrol.2008.05.012	Journal of Hydrology	2008	627	36,9
MULETA MK	10.1016/j.jhydrol.2004.09.005	Journal of Hydrology	2005	427	21,4
SCHUOL J	10.1029/2007WR006609	Water Resources Research	2008	287	16,9
ZHANG X	10.1016/j.jhydrol.2009.06.023	Journal of Hydrology	2009	183	11,4
ROSTAMIAN R	10.1623/hysj.53.5.977	Hydrological Sciences Journal	2008	181	10,6
NOORI N	10.1016/j.jhydrol.2015.11.050	Journal of Hydrology	2016	172	19,1
STRAUCH M	10.1016/j.jhydrol.2011.11.014	Journal of Hydrology	2012	167	12,8
NARSIMLU B	10.1007/s40710-015-0064-8	Environmental Processes	2015	153	15,3
SHEN ZY	10.5194/hess-16-121-2012	Hydrology and Earth System Sciences	2012	149	11,5
PERVEZ MS	10.1016/j.ejrh.2014.09.003	Journal of Hydrology: Regional Studies	2015	142	14,2
ROUHOLAHNEJ AD E	10.1016/j.envsoft.2011.12.001	Environmental Modelling & Software	2012	140	10,8
ZHANG X	10.1002/hyp.7152	Hydrological Processes	2009	131	8,2
ZANG CF	10.5194/hess-16-2859-2012	Hydrology and Earth System Sciences	2012	119	9,2
AYELE GT	10.3390/w9100782	Water	2017	117	14,6
KOUCHI DH	10.3390/w9060384	Water	2017	111	13,9
HERMAN MR	10.1016/j.jhydrol.2017.11.009	Journal of Hydrology	2018	110	15,7
ZHANG X	10.1002/hyp.7528	Hydrological Processes	2010	106	7,1
VAN GRIENSVEN A	10.2166/hydro.2007.104	Journal of Hydroinformatics	2007	102	5,7
SCHUOL J	10.5194/adgeo-9-137-2006	Advances in Geosciences	2006	102	5,4
WORKU T	10.1007/s12665-017-6883-3	Environmental Earth Sciences	2017	101	12,6
MENGISTU AG	10.1016/j.ejrh.2019.100621	Journal of Hydrology: Regional Studies	2019	89	14,8
TALEBIZADEH M	10.1007/s11269-009-9522-2	Water Resources Management	2010	87	5,8

A relação dos 20 principais periódicos científicos que publicaram sobre os softwares e algoritmos para calibração, validação e análise de incertezas com o SWAT e seu fator de impacto é apresentado na Tabela 2. É interessante notar que com exceção do Advances In Geosciences, os periódicos apresentam um fator de impacto (FI) maior que 2,5, sendo consideradas com alto prestígio científico. Neste estudo a revista Water que é a revista científica com maior número de publicações é uma das que apresenta menor IF. Por outro lado, as revistas Water Resources Research (IF=11.4) e Science Of The Total Environment (IF= 8,2) são as que publicaram apenas 4 artigos sobre a temática. Esta lista dos principais periódicos pode ser utilizada por pesquisadores da área, tanto para consultarem sobre o tema como para publicar.

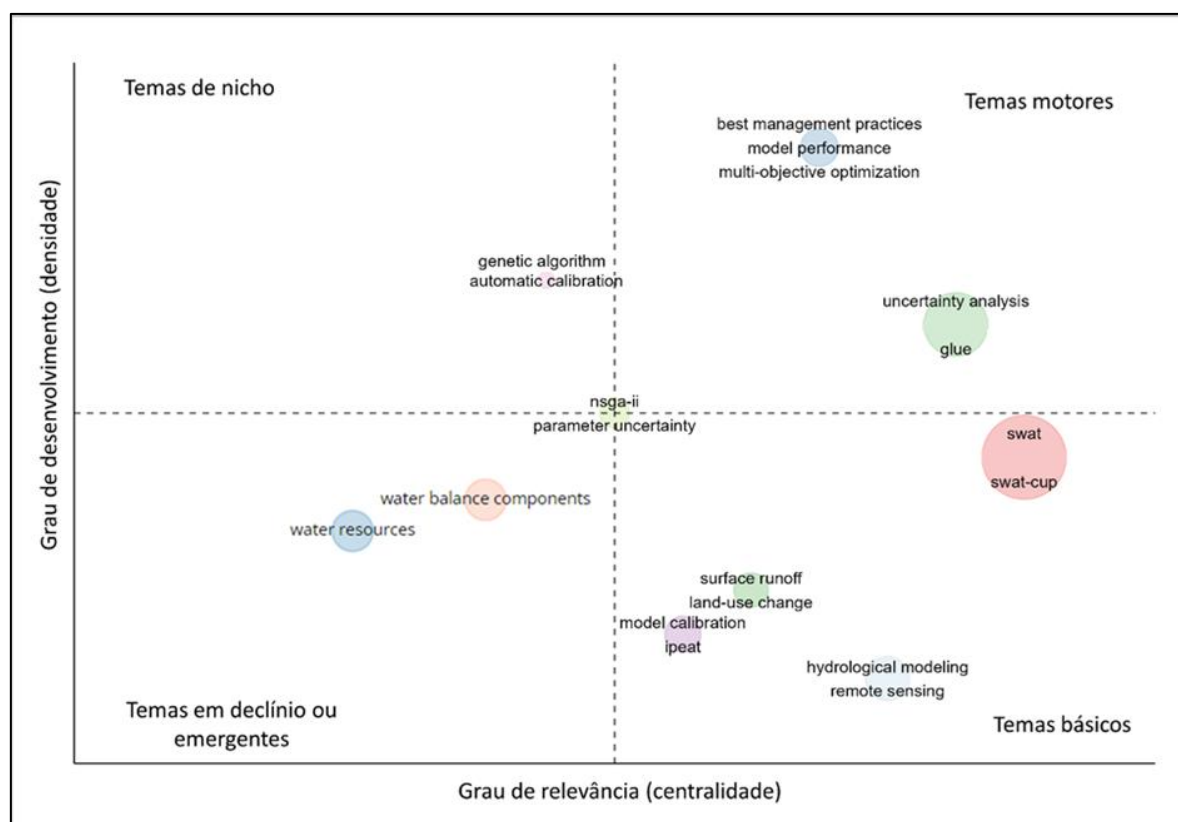
Tabela 2 - Os 20 periódicos mais citados e seu fator de impacto referente ao ano de 2023.

Revistas	Número de artigos publicados	Fator impacto (2023)
Water (Switzerland)	26	3,0
Journal Of Hydrology	13	2,8
Modeling Earth Systems and Environment	11	2,7
Hydrology And Earth System Sciences	9	5,7
Water Resources Management	6	3,9
Sustainability (Switzerland)	6	3,3
Environmental Modelling And Software	5	4,8
Environmental Earth Sciences	5	2,8
Hydrological Sciences Journal	5	2,8
Water Resources Research	4	11,4
Science Of The Total Environment	4	8,2
Journal Of Hydrology: Regional Studies	4	4,7
Stochastic Environmental Research And Risk Assessment	4	3,9
Hydrological Processes	4	2,8
Hydrology Research	4	2,6
Hydrology	3	3,1
Ecological Indicators	2	7,0
Applied Water Science	2	5,7
Ecological Engineering	2	3,9
Advances In Geosciences	2	----

O mapa temático (Figura 9) mostrou a presença de temas de nicho, temas base, temas motores e temas emergentes ou em declínio para a produção científica sobre os algoritmos e softwares usados para calibrar e validar o modelo SWAT. No

quadrante superior direito, foi identificado como temas motores (centrais e desenvolvidas) dois grupos de palavras-chave: best management practices, model performance, multi-objective optimization (cluster azul) e uncertainty analysis e glue (cluster verde) (Figura 9). Esses temas são bem desenvolvidos na área porque é importante realizar a calibração e validação do modelo, assim como as análises de incerteza para que o modelo hidrológico seja utilizado para simulação de cenários e represente com precisão as condições da bacia hidrográfica (Akoko et al., 2021; Athira; Nanda; Sudheer, 2018; Dubey et al., 2023; Kikoyo; Oker, 2023). O tema “best management practices” é um tema bem consolidado na modelagem com o SWAT, pois o modelo foi inicialmente desenvolvido para se avaliar os impactos das práticas de manejo sobre os recursos hídricos e a poluição difusa em bacias hidrográficas (Krysanova; Arnold, 2008; Wang et al., 2019).

Figura 9 - Representação das palavras-chave conforme a centralidade e densidade.



O quadrante inferior direito agrupa temas base que conversam com os demais temas. O tema “swat e swat-cup” são temas muito relevantes e bem desenvolvidos, sendo temas suporte, pois a partir deles é que se desenvolvem os demais temas

(Francesconi et al., 2016; Tan et al., 2021). Temas como “surface runoff” e “land use change” estão relacionados entre si, pois as mudanças no uso e cobertura da terra influenciam no escoamento superficial, sendo considerados temas básicos, pois a partir destes temas, estudos que buscam avaliar as mudanças climáticas e o balanço hídrico são desenvolvidos (Dubey et al., 2023; Ramírez; Carlos; Cejudo, 2023; Zhao et al., 2018). Estes temas apresentam relevância e grau de desenvolvimento maior que os temas dos clusters roxo e azul. O cluster roxo é composto pelos temas “ipeat” e “model calibration”. Eles estão relacionados entre si, pois a ferramenta IPEAT foi desenvolvida para a calibração do modelo SWAT. Observa-se que os temas apresentam relevância científica, mas ainda estão pouco desenvolvidos. A ferramenta IPEAT é de código aberto e gratuita, e já se apresenta adaptada para a versão mais recente do modelo (SWAT+), porém como aponta (Aloui et al., 2023), é uma ferramenta pouco explorada pelos pesquisadores. Por fim, o cluster azul, agrupou os temas “hydrological modeling” e “remote sensing”, indicando que são temas relevantes e com muito potencial de exploração (Khan; Khan; Guan, 2022; Koltsida; Kallioras, 2022; Ramírez; Carlos; Cejudo, 2023).

Já no quadrante inferior esquerdo estão agrupados os temas em declínio ou emergentes. Estes temas apresentam baixa densidade e baixa centralidade. Os clusters formados estão relacionados ao balanço hídrico e recursos hídricos. Estudos indicam que o estudo sobre os componentes do balanço hídrico e a gestão de recursos hídricos permanecem como áreas de pesquisa extremamente relevantes e em constante desenvolvimento (Aloui et al., 2023; Islam et al., 2024; Shah et al., 2024). Os desafios impostos pelas mudanças climáticas, o crescimento populacional e a necessidade de garantir a sustentabilidade dos recursos hídricos impulsionam a busca por novas abordagens, ferramentas e métodos para compreender e gerenciar os sistemas hídricos de forma eficiente e sustentável (Islam et al., 2024).

Por fim, no quadrante superior esquerdo aparecem temas mais especializados ou temas isolados dentro da temática estudada. Os temas “automatic calibration” e “genetic algorithm” estão relacionados entre si, mas a calibração automática usando algoritmos genéticos são temas pouco explorados na modelagem com o SWAT (Bekele; Nicklow, 2007; Ercan; Goodall, 2016). O tema central “parameter uncertainty” e “NSGA-II algorithm” significa que são temas que conversam com todos os demais, mas apresentam uma baixa frequência, fato que corrobora com os temas “automatic

calibration” e “genetic algorithm”. Algoritmos genéticos, como o NSGA-II, foram empregados no SwatShare para melhorar o processo de calibração, mostrando o potencial de maior exploração e otimização nas práticas de modelagem (Lin, 2020). Essas descobertas sugerem que se aprofundar nas técnicas de calibração automática e nos algoritmos genéticos pode levar a avanços na calibração do modelo SWAT e contribuir para a evolução da pesquisa de modelagem hidrológica (Li et al., 2015; Shah et al., 2024).

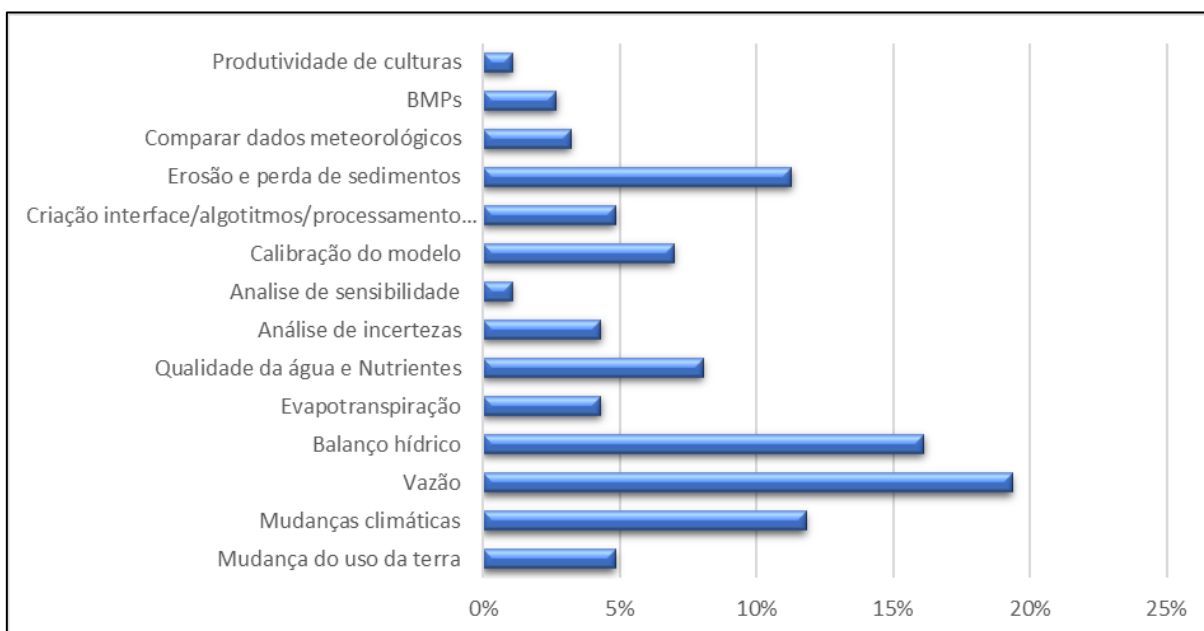
#### 4.3.2 REVISÃO SISTEMÁTICA

##### 4.3.2.1 Campos de aplicação do modelo SWAT

A revisão sistemática realizada por este estudo abordou aspectos quanto ao campo de aplicação do modelo SWAT, período temporal adotado para calibração e validação, tamanho da área de estudo e quanto aos softwares e algoritmos adotados por pesquisadores nos estudos sobre o SWAT. Os campos de aplicação do modelo SWAT nos artigos pesquisados, foram categorizados em 14 tipos baseados nos objetivos dos artigos. Na Figura 10, observa-se que os estudos sobre vazão representam 19% do total. Estes estudos buscam simular a vazão no exutório da bacia em um período determinado e prever a vazão futura.

O resultado encontrado corrobora com os estudos de (Akoko et al., 2021; Bressiani et al., 2015), que realizaram uma análise de 102 publicações brasileiras que utilizaram o SWAT entre 1999 e 2013 e descobriram que a maior porcentagem de investigações do SWAT (48%) se concentrou na vazão. Os estudos sobre os componentes do balanço hídrico ocupam o segundo lugar (16%), cujo objetivo foi estimar os volumes de cada componente e a simulação de novos cenários. Akoko et al. (2021), analisaram 206 estudos do SWAT publicados entre 2005 e 2019 e descobriram que a categoria mais comum de aplicação do SWAT eram os estudos de sobre vazão e balanço hídrico.

Figura 10 - Campos de aplicação dos estudos capturados nas bases de dados WoS e SOPUS.



Já os estudos sobre mudanças climáticas, representam 12% dos artigos publicados. Percebeu-se que houve um aumento nas publicações sobre esta temática ao longo dos anos, muito provavelmente pela importância que as mudanças climáticas estão tendo na atualidade. Tan et al. (2021), verificaram um aumento crescente no uso do SWAT para modelagem de mudanças climáticas desde 2016. Abdullah (2023), analisou as tendências de publicação na comunicação sobre mudanças climáticas e encontrou um aumento notável nas publicações desde 2008, particularmente no banco de dados Web of Science, indicando um reconhecimento crescente e um esforço concentrado de pesquisadores nesta área. Os estudos sobre erosão e perda de sedimentos ocupou a quarta posição com 11% dos artigos publicados. Para Bressiani et al. (2015), os sedimentos representavam o segundo campo de aplicação do SWAT no Brasil.

Verificou-se que a criação de interface, modificação de algoritmos ou melhoramento do processamento computacional representam 5% dos artigos encontrados. Os estudos sobre calibração do modelo (7%), análises de incertezas (4%) e análise de sensibilidade (1%) parecem representar uma pequena parte dos estudos selecionados, embora nossa busca tenha considerado como palavras-chave os termos "calibrat\*" OR "validat\*" OR "Sensitivity and uncertainty analysis ". Ou seja, pode-se inferir que pesquisas que busquem desenvolver novos calibradores e ou

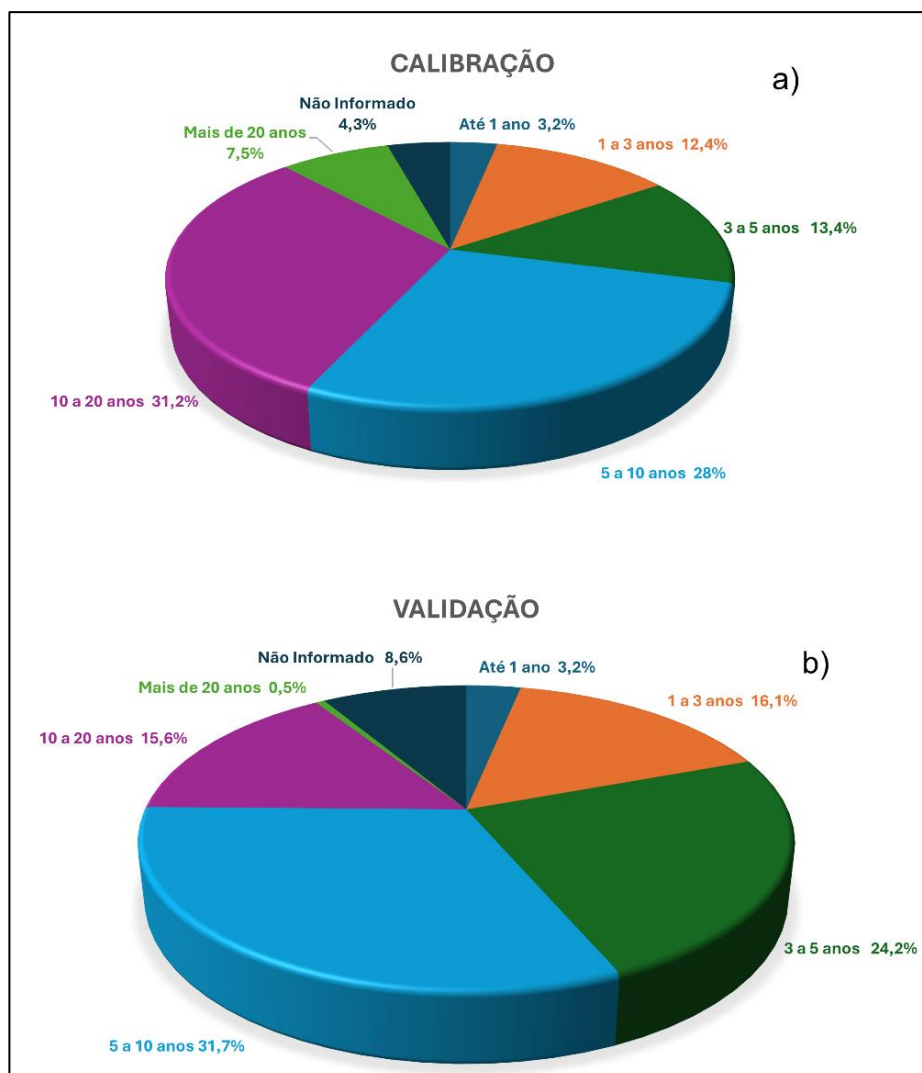
potencializar os processos de calibração, análises de incertezas e análise de sensibilidade do modelo podem vir a ser melhor explorados em pesquisas futuras.

#### 4.3.2.2 Período temporal adotado para calibração e validação

Os resultados obtidos para a série temporal utilizada para calibração e validação, demonstram que séries temporais de dados entre 10 e 20 anos foram encontradas em 31,2% dos artigos, 28% para 5 a 10 anos. De 3 a 5 anos (13,4%) e estudos com séries 1 a 3 anos representaram 12,4% (Figura 11a). Estes resultados indicam uma tendência para períodos de calibração mais longos. Destaca-se que um período maior que 20 anos representou apenas 7,5% dos artigos e que o número de artigos que não informaram o período de calibração foi de 4,3%.

O estudo de Bressiani et al. (2015) revelou que a maioria dos estudos no Brasil utilizaram menos de 5 anos de dados para calibração e validação, o que pode ser insuficiente para capturar a variabilidade hidrológica em muitas regiões. Com relação ao período de validação, observa-se na Figura 11b, que o período de validação de 5 a 10 anos (31,7%) foi o que apresentou maior frequência dos artigos, seguido pela classe de 3 a 5 anos (24,2%), 1 a 3 anos (16,1%) e a classe de 10 a 20 anos obteve 15,6% dos artigos. Pode-se perceber que a validação segue uma tendência de períodos mais curtos de tempo, o que vai de encontro ao que recomendam (Abbaspour et al., 2015; Arnold et al., 2012), para adotar dois terços do período de dados para calibração e um terço para validação dos dados.

Figura 11 - Percentual dos artigos encontrados na pesquisa e seu respectivos período usado para calibrar e validar o modelo SWAT.



Segundo (Koch et al., 2020; Sleziaik; Danko; Holko, 2019), é fundamental que modelos hidrológicos sejam calibrados com dados que abranjam períodos secos e úmidos e preferencialmente que abarquem uma longa série de dados. Isso não apenas maximiza o uso dos dados disponíveis, mas também ajuda a capturar variações sazonais que são fundamentais para melhorar a precisão do modelo.

A importância de considerar diferentes condições climáticas durante os períodos de calibração é amplamente reconhecida na literatura (Pool; Fowler; Peel, 2024; Shah et al., 2021; Yang et al., 2022). Estudos como o de Kim e Han (2017), destacam que essa abordagem ajuda a contabilizar as incertezas relacionadas a diferentes insumos e os impactos das mudanças climáticas. Por exemplo, períodos

secos podem revelar como um modelo responde a situações de escassez de água, enquanto períodos úmidos podem testar a capacidade do modelo em prever inundações e excesso de água.

Além disso, a inclusão de períodos úmidos e secos nos processos de calibração e validação é essencial para uma avaliação mais abrangente do desempenho do modelo sob diferentes regimes hidrológicos. Brighenti, Bonumá e Chaffe (2016), junto com (Koch et al., 2020), ressaltam que essa prática garante a robustez e confiabilidade do modelo. Ao lidar com diversos regimes hidrológicos, é possível assegurar que o modelo hidrológico seja capaz de simular com precisão a dinâmica dos recursos hídricos em diferentes condições, o que é fundamental para a sua eficácia a longo prazo. Desta forma, integrar cenários climáticos variados e maximizar a cobertura de dados nos modelos hidrológicos permite uma representação mais fiel das complexas interações dentro do ciclo hidrológico. Isso resulta em melhores capacidades preditivas, como afirmam Koch *et al.* (2020), e em avaliações mais precisas das estratégias de gerenciamento de recursos hídricos.

Modelos que conseguem prever com precisão essas dinâmicas são ferramentas valiosas para a tomada de decisões em gestão hídrica, especialmente em tempos de crescente preocupação com as mudanças climáticas. Entretanto, em muitas partes do mundo, a calibração e validação de modelos hidrológicos enfrentam um obstáculo significativo: a escassez de dados observados. Isso se deve, em grande parte, ao monitoramento hidrológico inadequado em várias bacias hidrográficas (Bennour et al., 2022).

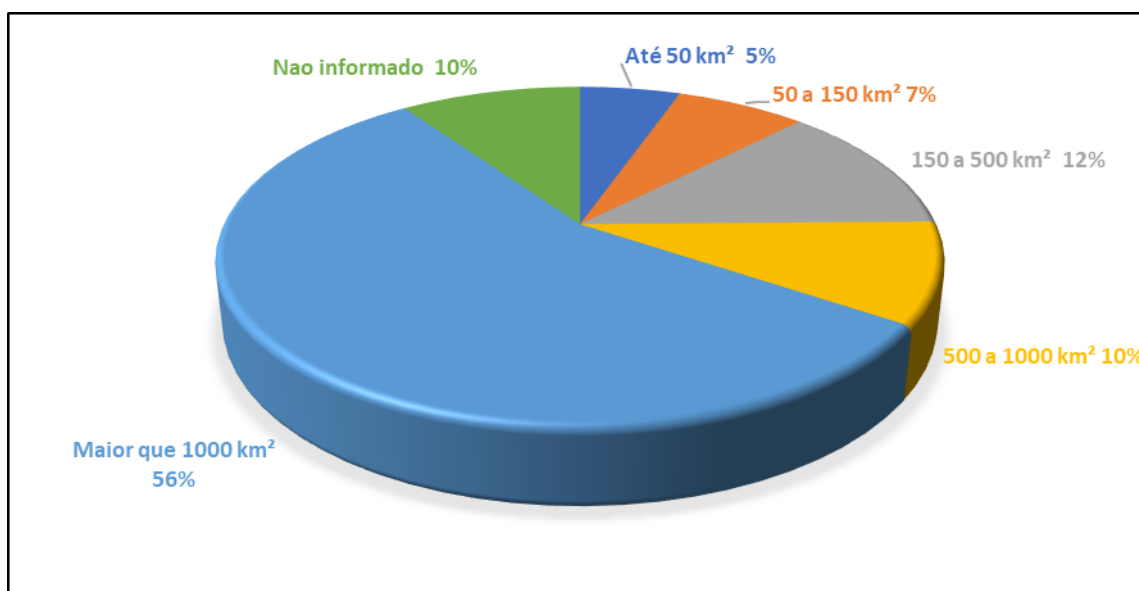
Diante desse desafio, pesquisadores como Baninajar, Sarang e Karbassi (2023) e Koltsida e Kallioras (2022), têm se dedicado a encontrar métodos alternativos que possam suprir essa lacuna de dados essenciais. Um dos caminhos mais promissores envolve o uso de tecnologias de ponta, como o sensoriamento remoto, dados de satélite e conjuntos de dados globais de reanálise de recursos hídricos (Senent-Aparicio et al., 2021). Esses métodos inovadores oferecem uma nova perspectiva na calibração de modelos hidrológicos, permitindo que os cientistas coletem informações valiosas em regiões onde os dados locais são escassos ou inexistentes (Alawi; Özkul, 2023; Cai et al., 2023; Senent-Aparicio et al., 2021). Segundo Athira et al. (2016), Franco e Bonumá (2017) e Koltsida e Kallioras (2022), essa abordagem não apenas melhora a precisão da modelagem hidrológica em

bacias hidrográficas mal calibradas ou não monitoradas, mas também fornece informações para o gerenciamento de recursos hídricos. Cabe salientar que os estudos supracitados utilizaram o modelo SWAT e não sua nova versão, o SWAT+.

#### 4.3.2.3 Tamanho da área de estudo

A análise dos artigos relacionados a esse modelo revela que mais de 55% das pesquisas são realizadas em áreas com extensão superior a 1000 km<sup>2</sup> (Figura 12). Por outro lado, apenas 5% dos estudos concentram-se em bacias menores ou iguais a 50 km<sup>2</sup>, indicando uma tendência predominante de aplicação do SWAT em regiões mais amplas. Essa preferência por grandes áreas pode estar associada à disponibilidade de dados e à complexidade dos desafios ambientais nessas regiões. Janjić e Tadić (2023) identificaram que 57% dos estudos de modelagem hidrológica com o SWAT foram realizados em bacias hidrográficas maiores que 2500 km<sup>2</sup>. Assim como Akoko et al. (2021), a maior quantidade de bacias hidrográficas simuladas na África estavam entre 1000 e 5000 km<sup>2</sup>.

Figura 12 - Tamanho das áreas de estudo encontradas sobre a temática abordada.



No entanto, o desempenho do SWAT em bacias menores não deve ser subestimado. Estudos como os de Brighenti et al. (2019), Hollaway et al. (2018), Oliver et al., (2014) e Sellami et al. (2013), mostram que, mesmo em bacias hidrográficas

menores, o SWAT pode ser eficaz. Esses estudos destacam que, com uma calibração adequada, o modelo pode simular com precisão o comportamento hidrológico dessas áreas, tornando-se uma ferramenta valiosa para a gestão de recursos hídricos em locais com menor disponibilidade de dados.

A eficácia do SWAT em bacias menores é ainda mais evidente quando comparamos a versão tradicional do modelo com o SWAT+, uma versão aprimorada do modelo. Conforme Kikoyo e Oker (2023), o SWAT+ apresenta um desempenho superior, especialmente em pequenas bacias hidrográficas. As melhorias na calibração e na seleção de dados de entrada permitem uma simulação mais precisa do rendimento hídrico, demonstrando a versatilidade do modelo em diferentes contextos geográficos e hidrológicos (Devkota; Lamichhane; Bhattarai, 2024; Smit et al., 2024). Portanto, embora a maioria dos estudos continue a se concentrar em grandes bacias hidrográficas, é importante reconhecer que o SWAT possui capacidades que se estendem a bacias menores (Francesconi et al., 2016). Janjić e Tadić (2023), enfatizam que a chave para o sucesso na aplicação do SWAT em diferentes escalas está na cuidadosa calibração e na adaptação do modelo às condições específicas de cada região. Essa abordagem não só amplia o potencial de uso do SWAT, mas também permite que ele se adapte a uma variedade de cenários ambientais e climáticos.

#### 4.3.2.4 Softwares e algoritmos

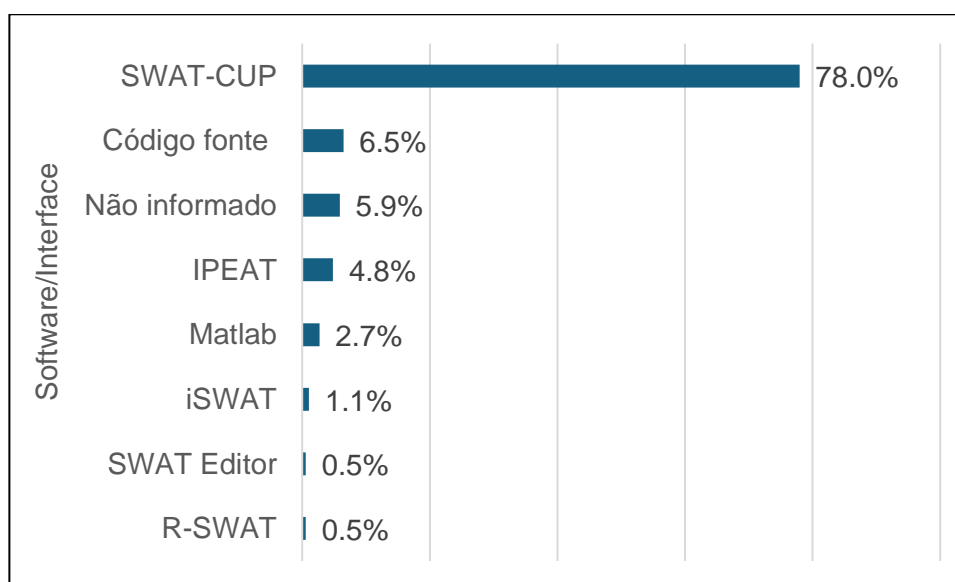
Dos 186 artigos selecionados para esta pesquisa, 179 utilizaram a versão SWAT, 2 artigos modificaram o SWAT e 5 artigos utilizaram a versão mais recente do modelo SWAT+ ou SWATplus. Com relação a interface GIS do SWAT, 151 artigos utilizaram a versão ArcSWAT contra 7 do QSWAT e 28 artigos não informaram a interface utilizada. O ArcSWAT é a interface gráfica de usuário (GUI) do SWAT baseada em ArcGIS® (software comercial) (Winchell et al., 2009) e o QSWAT é a baseada no QGIS (software open source) (Dile et al., 2016).

Os resultados dos artigos analisados foram classificados com base no software ou interface utilizada e, nos algoritmos escolhidos pelos pesquisadores em seus estudos, pois cada software pode incorporar uma variedade de algoritmos, cada um com suas características e finalidades específicas. Um exemplo notável é o SWAT-

CUP que integra cinco algoritmos distintos, cada um desempenhando um papel nas análises hidrológica, sendo eles: Generalized Likelihood Uncertainty Estimation (GLUE), Parameter Solution (ParaSol), Sequential Uncertainty Fitting Algorithm (SUFI-2), Markov Chain Monte Carlo (MCMC) e Particle Swarm Optimization (PSO) (Abbaspour, 2015).

De acordo com a Figura 13, o software mais utilizado foi o SWAT-CUP (78%). Os artigos que utilizam a linguagem Python ou Fortran foram consideradas como código fonte e representam 6,5% dos estudos. O Integrated Parameter Estimation and Uncertainty Analysis Tool Plus – IPEAT representa 4,8% dos artigos selecionados. O IPEAT (Ferramenta de Análise Integrada de Estimativa de Parâmetros e Análise de Incerteza) foi criado por Yen et al. (2014). O IPEAT, foi inicialmente vinculado ao SWAT no ambiente MATLAB. Hoje o IPEAT+, é desenvolvido em FORTRAN e vinculado ao SWAT+ diretamente no código-fonte (Yen et al., 2019).

Figura 13 - Principais softwares utilizados na modelagem com o SWAT.



O iSWAT (1,1%) é um programa de interface genérico desenvolvido por Yang, Abbaspour e Reichert (2005), para auxiliar na automação do procedimento de calibração de parâmetros em modelos hidrológicos do tipo SWAT. O SWAT Editor é uma interface de desktop desenvolvida para o SWAT+ (Bieger et al., 2017), que oferece aos usuários a capacidade de modificar arquivos de entrada, executar simulações, e realizar análises de sensibilidade e calibração de modelos hidrológicos.

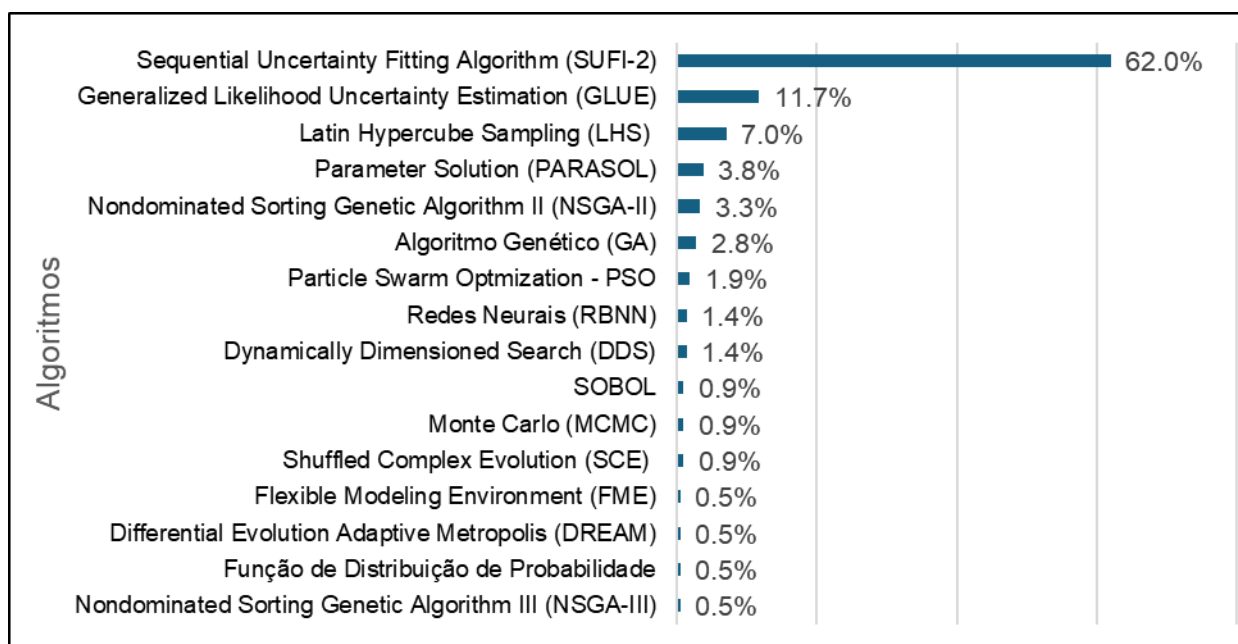
O SWAT Editor oferece dois tipos principais de calibração: calibração suave e calibração rígida (Bieger et al., 2017). A calibração suave é focada no equilíbrio de massa, o que significa que o principal objetivo é ajustar o modelo para que as entradas e saídas de massa estejam equilibradas de forma precisa. Este tipo de calibração é essencial para garantir que o modelo simule o ciclo hidrológico corretamente (Bieger et al., 2017). Por outro lado, a calibração rígida é mais específica e detalhada. Ela se concentra em alinhar o hidrograma simulado com o observado, ajustando os parâmetros do modelo até que os resultados simulados estejam o mais próximo possível dos dados reais (Bieger et al., 2017).

O software R-SWAT é uma ferramenta gratuita e de código aberto baseada em linguagem R e que apresenta uma interface gráfica de usuário interativa para calibração de parâmetros SWAT e SWAT+, análise de sensibilidade, análise de incerteza e visualização dos resultados do modelo (Nguyen et al., 2022). A popularidade do SWAT-CUP se justifica pelo fato de que nas versões antigas do SWAT (2005, 2009, 2012), o SWAT-CUP era gratuito. Na versão mais recente (SWAT+) deixou de ser, além do que, o software se destacava por integrar diversos algoritmos e técnicas para calibração de parâmetros, análises de sensibilidade e incerteza, apresentando opções de visualização de dados e interface gráfica de usuário (GUI) amigável (Lin et al., 2024; Nguyen et al., 2022). A introdução do SWAT+ impulsionou o desenvolvimento de alternativas gratuitas e de código aberto, como a ferramenta IPEAT+ (Yen et al., 2019), SWAT+ Toolbox (Chawanda, 2021) e o R-SWAT (Nguyen et al., 2022), que também oferecem funcionalidades para calibração e análise de incertezas em uma interface amigável. Essa demanda por opções personalizáveis ao SWAT-CUP, tem atraído a atenção da comunidade científica, pois o código-fonte do SWAT-CUP é fechado, o que limita a personalização pelos usuários (Nguyen et al., 2022).

Os resultados apresentados na Figura 14 indicam uma clara preferência por certos algoritmos na calibração e validação de modelos hidrológicos, em particular, no contexto do SWAT. O SUFI-2 é o algoritmo mais utilizado, com 62% do total das ocorrências, destacando-se como a escolha preferida entre os pesquisadores. Isso pode ser atribuído a eficiência em termos de tempo de computação e recursos e por incorporar incertezas de parâmetros, de dados de entrada e estrutura do modelo,

forneendo intervalos de confiança para suas previsões, o que é altamente valorizado na modelagem hidrológica (Schuol; Abbaspour, 2006).

Figura 14 - Algoritmos utilizados pelos pesquisadores do SWAT.



O GLUE é o segundo algoritmo mais utilizado, com 11,7% das ocorrências, é projetado para lidar explicitamente com a incerteza de modelos, permitindo uma abordagem probabilística que é atraente para muitos modeladores (Ayele et al., 2017). O Latin Hypercube Sampling (LHS) em terceira posição (7%) é um método de amostragem estatística que é frequentemente utilizado por sua capacidade de explorar eficientemente o espaço de parâmetros de modo uniforme (Cibin et al., 2014). Em quarta posição está o Parameter Solution (PARASOL) que oferece ajustes de parâmetros altamente focados, úteis para refinamentos detalhados (Yang et al., 2008). Já o Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II) é conhecido por suas capacidades multiobjetivas, permitindo a otimização de vários critérios simultaneamente, o que pode ser atraente em estudos complexos de recursos hídricos (Wu et al., 2022). Sendo assim, os resultados encontrados apontam para uma preferência dos pesquisadores pelo algoritmo SUFI-2. O SUFI-2 se destaca por sua eficiência em calibração, exigindo um número relativamente baixo de execuções do modelo em comparação com outros algoritmos de otimização como os algoritmos genéticos (Bayat; Alizadeh; Mojaradi, 2023). Essa característica é particularmente

valiosa para modelos complexos com muitos parâmetros, como o SWAT, onde o tempo de processamento pode ser um fator limitante. No futuro, à medida que a tecnologia avança, pode-se esperar um aumento na utilização de algoritmos multiobjetivos e inteligentes, como o NSGA-II e NSGA-III, que podem enfrentar os desafios cada vez mais complexos da modelagem hidrológica (Hernandez-Suarez et al., 2018). Esta evolução na escolha de algoritmos mais eficientes reflete a dinâmica da pesquisa hidrológica em resposta às necessidades em constante mudança de precisão e capacidade preditiva nos modelos ambientais (Liu et al., 2023).

#### 4.4 Conclusão

A evolução dos estudos sobre softwares e algoritmos utilizados para a análise de sensibilidade, calibração, validação e análise de incertezas do modelo SWAT foi apresentada a partir de uma avaliação cientométrica e uma revisão sistemática. Considerando as nossas questões de pesquisa, nossos dados suportam as seguintes conclusões:

(1) Os estudos sobre softwares e algoritmos utilizados para a análise de sensibilidade, calibração, validação e análise de incertezas do modelo SWAT tiveram início em 2005, sendo que os artigos mais citados foi o artigo intitulado “SWAT model use calibration and validation” do ano de 2012. Os autores mais relevantes foram Abbaspour e Srinivasan tanto em número de documentos publicados como em número de citações por ano. Há uma forte colaboração entre e intragrupos de pesquisas entre os desenvolvedores do modelo SWAT e o desenvolvedor do SWAT-CUP. A versão mais recente do modelo, o SWAT+ é muito pouco explorada, assim como a interface QSWAT, inclusive em artigos dos últimos 5 anos.

(2) O software SWAT-CUP é o mais utilizado para análise de sensibilidade, calibração, validação e análises de incertezas ao longo dos anos. Softwares *open sources* como o R-SWAT ou o IPEAT+ e o SWAT Toolbox ainda são pouco explorados pelos pesquisadores.

(3) A modelagem hidrológica com o SWAT foi aplicada em bacias hidrográficas com mais de 1000 km<sup>2</sup> e as bacias hidrográficas de até 150 km<sup>2</sup> representaram apenas 12% dos periódicos selecionados.

(4) A revista científica Water foi a que publicou mais periódicos sobre o tema desde 2005, com 26 publicações. As revistas Journal Of Hydrology e Modeling Earth Systems and Environment ocuparam a segunda e terceira posição. O fator de impacto destas revistas são 3, 2,8 e 2,7 respectivamente.

(5) O período adotado pelos estudos selecionados para a calibração do modelo foi de 10 a 20 anos e de 5 a 10 anos para validação. Longos períodos são preferidos por contemplar períodos secos e úmidos, além de apresentar alta disponibilidade de dados observados.

Identificamos uma lacuna geográfica importante, em que os países da América do Sul, África, Ásia Central e Europa Oriental, apresentam poucas ou nenhuma publicação sobre o tema. Os motivos para tal lacuna pode estar associados a infraestrutura inadequada das instituições de pesquisa, falta de financiamentos e capacitação técnica para novos modeladores, assim como fatores geopolíticos.

Verificamos uma carência de estudos que comparem os softwares R-SWAT, SWAT Toolbox e IPEAT+, utilizando algoritmos como o Dynamically Dimensioned Search e Sobol em bacias de até 150 km<sup>2</sup> e que utilizem a versão mais recente do modelo (SWAT+). Pode-se verificar ainda que estudos que foquem exclusivamente nos processos de calibração e validação, criação de interfaces (GUI) e ou novos algoritmos e processamento computacional, são pouco explorados, pois estes estudos representaram 12% do total das publicações.

## **5 CAPÍTULO 2 – ANÁLISE DE DESEMPENHO DO MODELO SWAT+: ESTUDO COMPARATIVO ENTRE DIFERENTES SOFTWARES E ALGORITMOS**

Uma versão adaptada deste capítulo está em processo de revisão na  
Advances in Water Resources

### **5.1 Introdução**

A agricultura é uma atividade essencial para a produção de alimentos e para o sustento da população mundial, por isso considera a maior consumidora de água (Getachew; Manjunatha, 2022; Giller et al., 2021). No entanto, a expansão das áreas cultivadas e a adoção de práticas agrícolas inadequadas têm acarretado significativos impactos ambientais (Admas et al., 2022). Esses impactos incluem a remoção da cobertura do solo, desmatamentos, compactação e impermeabilização do solo, perda de nutrientes e matéria orgânica, favorecendo a perda de produtividade das culturas e a introdução de substâncias tóxicas nos cursos d'água (Chadli, 2016). Além disso, tais práticas alteram a dinâmica da água hidrológica, aumentando o escoamento superficial, reduzindo a infiltração de água no solo e elevando a evapotranspiração (Armoa et al., 2023).

A bacia hidrográfica do arroio Cadeia (BHAC), é uma sub-bacia da bacia hidrográfica do arroio Pelotas (BHAP) que é uma das principais contribuintes da bacia hidrográfica da Lagoa Mirim-São Gonçalo (ADLM, 2024). A BHAC é uma área estratégica para o desenvolvimento econômico, ambiental e social da região, especialmente devido às atividades agrícolas predominantes, como o cultivo de milho, soja, fumo e eucalipto. No entanto, essa bacia enfrenta desafios significativos, resultantes de práticas agrícolas não conservacionistas, que têm contribuído para a intensificação dos processos erosivos e a consequente degradação do solo (Suzuki et al., 2021). Para reduzir a perda de produtividade e a degradação do solo, bem como

seus impactos negativos, os estudos voltados para a compreensão da dinâmica da água em bacias hidrográficas se tornam essenciais (Aliyari; Bailey; Arabi, 2021). Esses estudos fornecem suporte para que agricultores, gestores público e tomadores de decisão possam escolher as melhores estratégias de uso da água em setores como a agricultura, abastecimento público e geração de energia (Aloui et al., 2023; Francesconi et al., 2016). Para compreender essa dinâmica da água em processos hidrológicos, são utilizados modelos hidrológicos como o *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) (Aflah, 2022; Silva et al., 2023).

O modelo SWAT é um modelo conceitual originalmente criado para prever como o uso e manejo do solo afetam a produção de água, sedimentos e produtos químicos em bacias agrícolas (Arnold et al., 1998). Para aumentar a eficiência do modelo, foi desenvolvida uma versão mais avançada chamada SWAT+ (Bieger et al., 2017). Esta atualização do SWAT original incorpora funcionalidades aprimoradas de roteamento de escoamento e uma interface GIS baseada em Python, utilizando as capacidades do QGIS por meio da interface QSWAT+ (Armoa et al., 2023; Dile; Srinivasan; George, 2022). Estudos comparativos mostram que a transição para o SWAT+ manteve a precisão das simulações hidrológicas e que superou o SWAT na representação de processos hidrológicos (Kakarndee; Kositsakulchai, 2020; Kikoyo; Oker, 2023; Wagner et al., 2022). Embora as técnicas de configuração do modelo sejam semelhantes, o SWAT+ apresenta mudanças substanciais no código e na organização dos arquivos, oferecendo maior flexibilidade no planejamento de gestão e controle de roteamento em comparação ao seu antecessor (Bieger et al., 2017).

Entretanto, os modelos são ferramentas que representam processos do mundo real. O propósito do SWAT+ e de outros modelos hidrológicos não é reproduzir a realidade de forma exata, mas oferecer uma representação simplificada e confiável dos complexos processos hidrológicos (Moravcova et al., 2024). Assim, a calibração e a validação são etapas fundamentais no desenvolvimento e aplicação de modelos hidrológicos, assegurando que o modelo seja confiável e que seus resultados sejam representativos da área de estudo (Brighenti et al., 2019a; Kikoyo; Oker, 2023). Porém, para Harifidy et al. (2024), o modelo SWAT+ exige uma ampla gama de parâmetros e dados de entrada e uma das dificuldades da utilização do modelo, está

na avaliação da sensibilidade, calibração e validação de parâmetros, além da análise de incertezas.

A análise de sensibilidade (SA) destaca os parâmetros do modelo que exercem maior impacto nos resultados, e os achados frequentemente oferecem uma compreensão mais profunda do comportamento do sistema hidrológico (Lopes et al., 2022; van Griensven et al., 2006). Existem diversas técnicas para realizar a análise de sensibilidade, geralmente divididas em abordagens locais e globais (Abbas et al., 2024). As abordagens locais observam como a saída do modelo muda ao ajustar um parâmetro enquanto mantém os demais fixos (Negewo; Sarma, 2021; van Griensven et al., 2006). Em contraste, as abordagens globais avaliam simultaneamente a influência de várias mudanças nos parâmetros sobre a variabilidade da saída do modelo (Abbas et al., 2024). Conforme Abbaspour et al. (2015), um parâmetro é considerado menos sensível quanto menor for o impacto de suas variações no valor da função objetivo. Dessa forma, a análise de sensibilidade indica os principais parâmetros para os procedimentos futuros de calibração e validação de modelos.

No processo de calibração, ajustam-se os parâmetros que influenciam as previsões do SWAT+ com base em dados observados, enquanto a validação compara os resultados do modelo com os dados reais, sem alterar os parâmetros ajustados (Nguyen et al., 2022). O ajuste dos parâmetros pode ser feito tanto manualmente quanto automaticamente. A calibração manual consiste em ajustar os parâmetros do modelo por meio de tentativa e erro, comparando os resultados obtidos com os dados de campo até atingir uma correspondência aceitável, embora seja um processo bastante laborioso (Negewo; Sarma, 2021). Já a calibração automática utiliza algoritmos numéricos para identificar a combinação ideal de parâmetros que melhor se ajusta com os dados observados (Abbas et al., 2024; Arnold et al., 2012).

Há diversos softwares para análise de sensibilidade, calibração automática e validação do modelo SWAT+, dentre eles citam-se o SWATplus-CUP (Programa de Calibração e Incerteza do SWAT+) (Abbaspour et al., 2007), IPEAT+ (Ferramenta Integrada de Estimativa de Parâmetros e Análise de Incerteza Plus) (Yen et al., 2019), o SWAT+ Toolbox (Chawanda, 2021) e recentemente o R-SWAT (ambiente R para SWAT e SWAT+) (Nguyen et al., 2022), sendo que o único que é um software

comercial é o SWATplus-CUP, os demais são softwares livres. O IPEAT+ é o único dos citados que não possui uma interface gráfica do usuário (GUI) intuitiva.

Cada software possui algoritmos diferentes para calibração, validação, análise de sensibilidade e incertezas. Considerando os algoritmos prontamente disponíveis nos softwares e que não necessitam de nenhum *script*, o software IPEAT+ possui apenas o algoritmo Dynamically Dimensioned Search (DDS) para calibração; o SWAT+ Toolbox possui o algoritmo Latin Hypercube-One Factor at a Time (LH-OAT), Fourier Amplitude e o Sobol para análise de sensibilidade e o DDS (Dynamically Dimensioned Search) ou o Differential Evolution Adaptive Metropolis (DREAM) para calibração; o R-SWAT possui uma gama maior de algoritmos, como o SUFI-2 para análise de sensibilidade e calibração dos parâmetros, DDS e o Generalized Likelihood Uncertainty Estimation (GLUE) para calibração. Para análise de incertezas tanto o R-SWAT como o SWAT+ Toolbox utilizam da abordagem SUFI-2 (Chawanda, 2021; Nguyen et al., 2022). A seleção de um algoritmo de otimização para a calibração de modelos é influenciada por vários aspectos, como a complexidade do modelo, o tempo necessário para sua execução e os recursos computacionais disponíveis (Das et al., 2024).

A relevância deste estudo é fundamentada na necessidade de aprofundar a compreensão sobre a eficácia de novos softwares gratuitos para calibração e validação do modelo SWAT+, especificamente o R-SWAT e o SWAT Toolbox, em cenários ainda pouco explorados na literatura. Embora Harifidy et al. (2024), tenham conduzido um estudo comparativo desses softwares com o SWAT e SWAT+, existem diferenças metodológicas substanciais que justificam a realização de uma nova investigação. O estudo anterior se concentrou em uma grande bacia hidrográfica, utilizando apenas dados de vazão mensais com uma longa série de dados observados e a análise de sensibilidade foi realizada à parte. Em contraste, este estudo focará em uma pequena bacia rural, considerando tanto dados de vazão mensais quanto diários, além de uma série de dados observados mais limitada. Esse contexto é representativo de muitos cenários reais, onde a disponibilidade de dados é restrita e, portanto, reflete um desafio prático frequentemente enfrentado na gestão de recursos hídricos pelos modeladores (Mengistu et al., 2024; Mussehl et al., 2024).

Além disso, a utilização de dados de precipitação observados, em oposição aos dados estimados, agrega uma camada adicional de rigor metodológico e relevância prática, pelo fato de que os dados observados frequentemente oferecem uma representação mais precisa das condições locais. Outra vantagem significativa do presente estudo é a abordagem para as simulações.

Diferentemente do estudo de Harifidy *et al.* (2024), que estabeleceu um número máximo de iterações, este trabalho adotará uma estratégia onde as simulações serão conduzidas até que uma função objetivo satisfatória seja atingida. Essa abordagem flexível é mais adequada para capturar a complexidade dos processos hidrológicos, garantindo que o processo de calibração não seja interrompido prematuramente e que os parâmetros do modelo sejam ajustados com maior precisão (Hanchane et al., 2023; Kalmár et al., 2023). A escassez de estudos que explorem essas nuances, aliada à relativa novidade dos softwares R-SWAT e SWAT+ Toolbox, torna este trabalho não apenas relevante, mas também necessário para a comunidade científica, contribuindo para o avanço no uso e na compreensão dessas ferramentas em diferentes contextos hidrológicos. Com base no exposto, este estudo objetivou realizar uma comparação e avaliar o desempenho do modelo SWAT+ através dos softwares R-SWAT e SWAT+ Toolbox, utilizando diferentes algoritmos para calibração e validação em uma bacia hidrográfica rural do sul do Rio Grande do Sul, analisando sua eficiência e aplicabilidade prática.

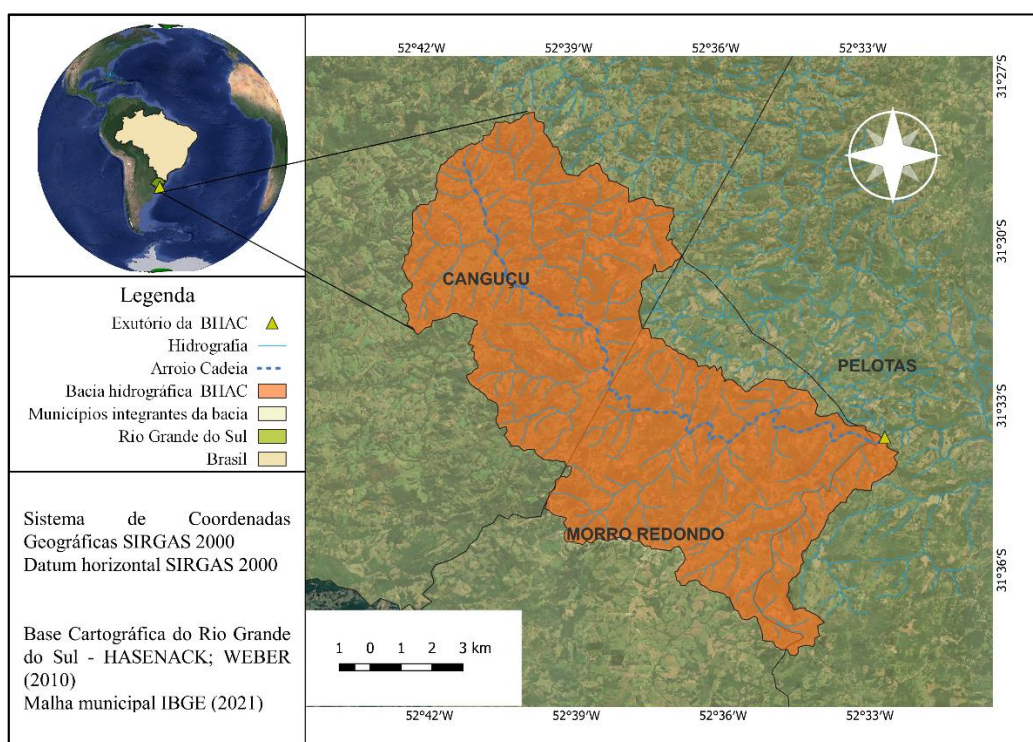
## **5.2 Material e Métodos**

### **5.2.1 ÁREA DE ESTUDO**

A bacia hidrográfica do arroio Cadeia (BHAC) encontra-se na região Sudeste da bacia hidrográfica Atlântico, na sub-bacia da Lagoa Mirim (Agência de Desenvolvimento da Lagoa Mirim - (ADLM, 2024)), entre as coordenadas geográficas 31°39' a 31°27' de latitude Sul e 52°33' a 52°42' de longitude Oeste, localizada no estado do Rio Grande do Sul. O arroio Cadeia é considerado um dos principais afluentes do arroio Pelotas, que é um importante manancial hídrico para a região de Pelotas, pois é fonte de captação de água para abastecimento público para a cidade

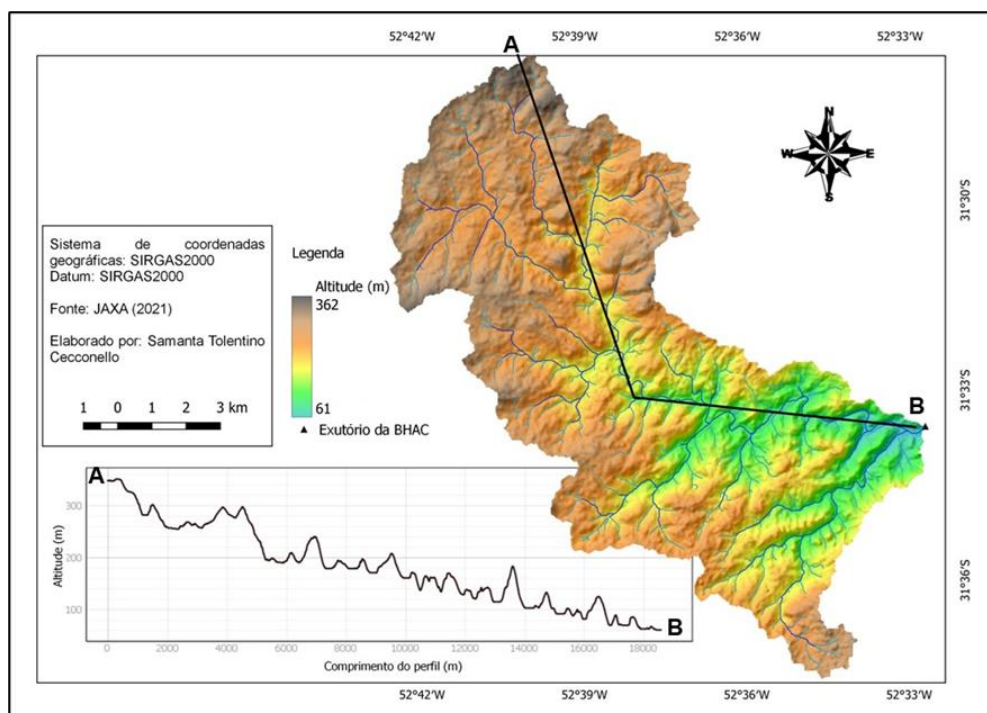
(SANEP, 2022). A BHAC engloba os municípios de Pelotas, Morro Redondo e Canguçu, sendo que a área da bacia correspondente a cada município é de 6,85%, 43,02% e 50,13% respectivamente. A bacia apresenta uma área de drenagem de 121,97 Km<sup>2</sup>. A característica predominante da BHAC é seu caráter agrícola, com pequenas propriedades rurais que cultivam milho, soja, tabaco, eucalipto, pastagem, pêsego, uva e criação de animais para obtenção de leite e turismo rural (Censo Agropecuário IBGE 2017). Na Figura 15 está apresentada a localização da bacia hidrográfica do arroio Cadeia.

Figura 15 - Mapa de localização da bacia hidrográfica do arroio Cadeia (BHAC).



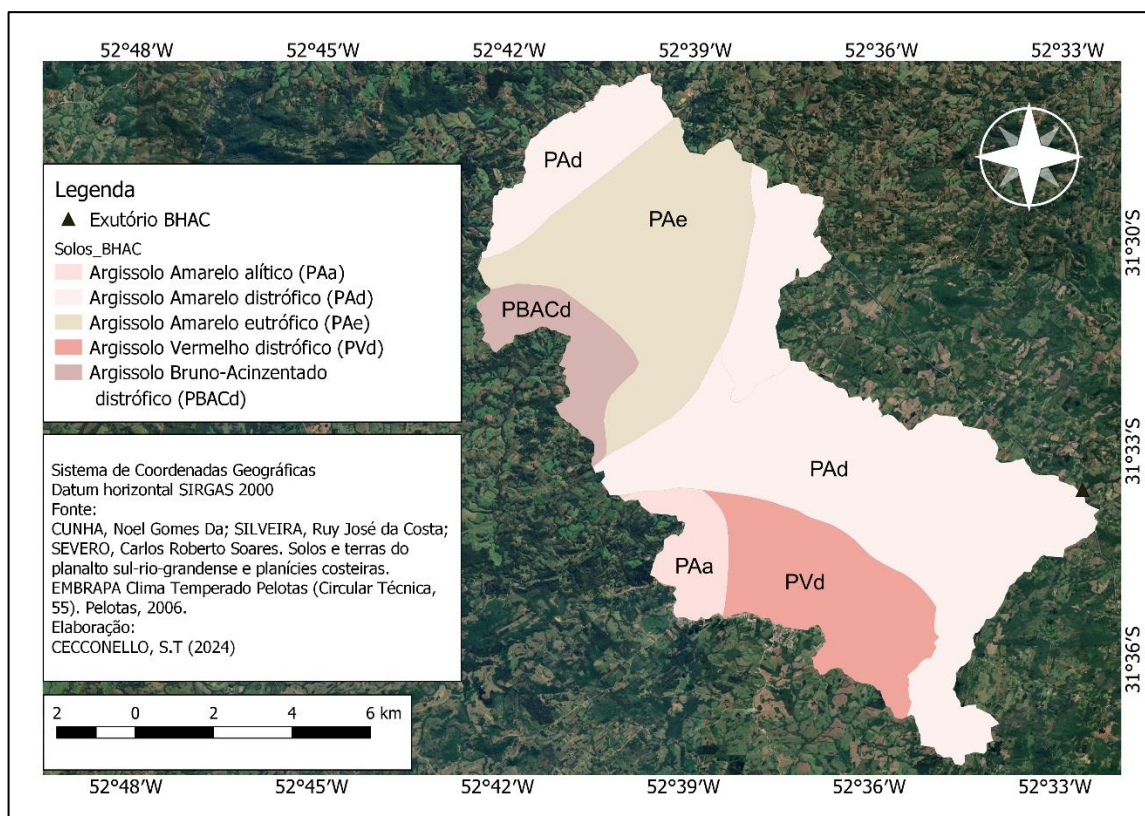
De acordo Kuinchtner e Buriol (2001), seguindo a classificação climática de Köppen o tipo de clima da BHAC é Cfa, subtropical úmido com temperatura média do ar do mês mais quente acima de 22 °C. A temperatura e a precipitação média anual da área são de 14,1 °C e 1.439,5 mm, respectivamente (Wrege et al., 2012). A BHAC apresenta altitudes que variam de 61 metros (próximo ao exutório) a 362 metros (próximo ao divisor de águas). A Figura 16 apresenta o perfil topográfico no sentido noroeste-sudeste e o mapa hipsométrico para a BHAC.

Figura 16 - Mapa hipsométrico da bacia hidrográfica do arroio Cadeia com perfil topográfico.



Na BHAC há predomínio de três tipos de solos (Figura 17), conforme levantamento realizado por (Cunha; Silveira; Severo, 2006) e segundo o Sistema Brasileiro de Classificação do Solo (Santos et al., 2018). Para a representação espacial e caracterização dos atributos dos solos na BHAC foi considerado até o 3º nível categórico, a saber: Argissolo Vermelho Distrófico (PVd), Argissolo Amarelo Eutrófico (PAe), Argissolo Amarelo Distrófico (PAd), Argissolo Amarelo Alítico (PAa) e Argissolo Bruno-Acizentado Distrófico (PBACd), sendo que suas áreas correspondem respectivamente a 14,32%, 24,07%, 50,88%, 4,50% e 6,24% da BHAC.

Figura 17 - Tipos de solos encontrados na bacia hidrográfica do arroio Cadeia (BHAC).



## 5.2.2 CONFIGURAÇÕES DO MODELO SWAT+

A modelagem hidrológica para a BHAC foi construída através da interface QSWAT+ no QGis versão 3.22.12 Białowieża (Dile; Srinivasan; George, 2022) e com o SWAT+ versão 2.2.0 (Bieger et al., 2017). Os dados hidrometeorológicos diários utilizados pelo SWAT+ correspondem à precipitação (mm H<sub>2</sub>O), temperatura máxima/mínima do ar (°C), radiação solar (MJ/m<sup>2</sup>dia), velocidade média do vento (m/s) e umidade relativa do ar (%), estes foram obtidas junto à Estação Meteorológica da Estação Experimental da Cascata na Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA (EMBRAPA, 2020). Foram utilizados dados de precipitação diária de duas estações pluviométricas da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico - ANA, cujas séries históricas diárias foram obtidas na plataforma HidroWeb – Sistema de Informações Hidrológicas (ANA, 2020), uma do Banco de Dados Meteorológicos do Instituto Nacional de Meteorologia BDMEP (INMET, 2020), dez estações pluviométricas e uma estação fluviométrica monitoradas pelo Grupo de Pesquisa em

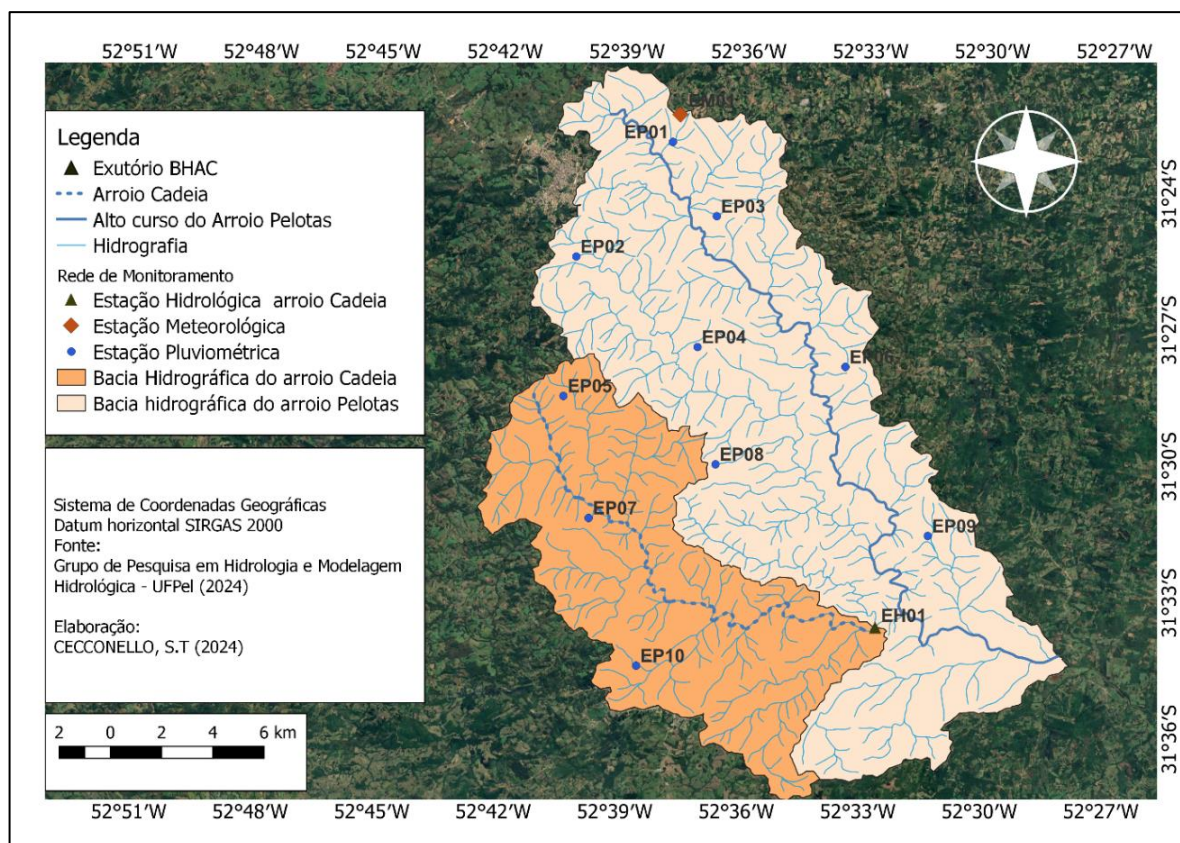
Hidrologia e Modelagem Hidrológica da UFPel (GPHMH), conforme apresentado na Tabela 3 e Figura 18.

Tabela 3 - Estações pluviométricas, meteorológica e fluviométrica utilizadas para a bacia hidrográfica do arroio Cadeia, bem como a série histórica disponível.

Código	Nome da estação	Coordenadas Geográficas		Elevação (m)	Órgão Responsável	Série Histórica
		Latitude Sul	Longitude Oeste			
EH01	Estação hidrológica Cadeia <sup>c</sup>	31,55°	52,54°	61	GPHMH	17/03/2015 a 30/03/2019
EP01		31,38°	52,63°	302		
EP02		31,42°	52,67°	370		
EP03		31,41°	52,61°	314		
EP04		31,45°	52,62°	268		
EP05	Estação pluviométrica <sup>a</sup>	31,47°	52,67°	300	GPHMH	01/06/2014 a 31/12/2019
EP06		31,46°	52,55°	291		
EP07		31,52°	52,66°	281		
EP08		31,50°	52,61°	285		
EP09		31,52°	52,52°	125		
EP10		31,57°	52,64°	225		
00002	EMBRAPA (Cascata) <sup>b</sup>	31,47°	52,51°	169	EMBRAPA	01/01/1994 a 31/12/2019
C03152003	Canguçu <sup>a</sup>	31,40°	52,67°	391	ANA	
C03152016	Ponte Cordeiro de Farias <sup>a</sup>	31,57°	52,46°	41	ANA	01/01/1990 a
83895	INMET <sup>a</sup>	31,80°	52,40°	11	INMET	31/12/2019

<sup>a</sup>Estação pluviométrica; <sup>b</sup>Estação meteorológica; <sup>c</sup>Estação fluviométrica.

Figura 18 – Distribuição das estações pluviométricas, meteorológicas e fluviométrica utilizadas para obtenção dos dados de entrada do modelo SWAT+.



A série histórica dos dados climáticos e de precipitação diária abrangeu o período de 01/01/1990 e 31/12/2019. Os dados de precipitação diária foram consistidos, a fim de identificar falhas e valores incoerentes, através do *software System of Hydrological Data Acquisition and Analysis – SYHDA* (UFPEL, 2020). Os dados faltantes foram preenchidos pelo método de interpolação do inverso da distância (IDW) para o centróide de cada sub-bacia, através de rotinas computacionais (Rotava; Bressiani, 2020). Os dados espaciais utilizados nesse estudo foram:

- Modelo Digital de Elevação (MDE), do ALOS World 3D (AW3D30) com resolução espacial de 30 metros (JAXA, 2021);
- Mapa de classes de solos, elaborado por Cunha, Silveira e Severo para o COREDE Sul em escala 1:436.000 (Cunha; Silveira; Severo, 2006)
- Atributos físico-hídricos dos solos, listadas em estudos desenvolvidos pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), em diversos municípios do Rio Grande do Sul;

- Mapa de usos e cobertura da terra, obtido do Projeto de Mapeamento Anual do Uso e Cobertura da Terra no Brasil, o MAPBIOMAS para o ano de 2015, com escala 1:100.000 (MAPBIOMAS, 2021).

Os atributos físico-químicos dos solos necessários para entrada no modelo SWAT+, foram obtidos por meio de parâmetros texturais extraídos de Cunha, Silveira e Severo (2006), e da classificação de Sartori, Neto e Genovez (2005), para o enquadramento dos solos nos seguintes grupos hidrológicos: grupo B (PVD), grupo C (PAA, PAD, PAE) e grupo D (PBACD), que se caracterizam por apresentarem baixa permeabilidade, com profundidade baixa à moderada (Da Cunha et al., 2019; Steinmetz, 2020). Estas informações foram utilizadas para, através de funções de pedotransferência estimar os demais parâmetros necessários ao modelo, dentre eles: condutividade hidráulica do solo saturado, capacidade de armazenamento de água no solo, fator de erodibilidade, densidade, dentre outros (Balaji; Dhanesh, 2011).

A decisão pela escolha do ano de mapeamento de uso e cobertura da terra se deu em virtude dos dados de vazão observados iniciarem neste período. Embora existam dados de vazão disponíveis para a BHAC até 2019, estes apresentavam muitas falhas, portanto, decidiu-se adotar o período de 2015 a 2017.

Para delimitação das sub-bacias adotou-se os limites de tamanho para a criação dos canais (channel) e córregos (stream), com 10 ha e 100 ha, respectivamente (DILE; SRINIVASAN; GEORGE, 2022). As unidades de paisagem foram definidas por meio da ferramenta DEM *inversion*, com o valor limite de declividade igual a 0,1 (10%) que é o *default* do QSWAT+. Para a criação das unidades de resposta hidrológica (HRUs) filtrou-se pelo tamanho de área, sendo definido o limiar de 10% (Bressiani, 2016; Kmoch et al., 2022). A Tabela 4 apresenta os usos e coberturas da terra identificados na BHAC para o ano de 2015.

Tabela 4 - Classes de uso e cobertura da terra para o ano de 2015 e o quantitativo da área existente na bacia hidrográfica do arroio Cadeia.

Classes de uso do MAPBIOMAS	Classes no banco de dados do SWAT+	Classificação do tipo de planta no SWAT+	Área correspondente na BHAC	
			Km <sup>2</sup>	%
Formação florestal	Forest-Mixed (FRST)	Árvore	47,66	39,08
Silvicultura - Eucalipto	Eucalyptus (EUCA)	Árvore	0,758	6,22
Campo alagado	Wetlands (WETL)	Perene	0,018	0,00
Formação campestre	Range-brush (RNGB)	Perene	44,74	36,69
Pastagem	Winter Pasture (WPAST)	Perene	4,93	4,04
Área urbana	Residential-Low Density (URLD)		0,20	0,16
Outras áreas não vegetadas	Transportation (UTRN)	Não se aplica	0,24	0,2
Água	Water (WATR)		0,009	0,01
Soja	Soybean (SOYB)	Leguminosa anual de estação quente	16,29	13,36
Lavouras temporárias	Agricultural Land Generic (AGRR)	Anual de estação quente	0,35	0,26
Total			121,97	100

Os diferentes usos e coberturas da terra encontrados na BHAC foram associados às classes existentes no banco de dados do modelo através do arquivo “plant.dat”, sendo assim, utilizou-se os valores padrão do modelo para as culturas (Arnold et al., 2012). O modelo viabiliza a diferenciação dos processos que serão simulados em cada cultura pois, para cada uma, há parâmetros diferentes relacionados ao índice de área foliar inicial, biomassa inicial, número total de unidades de calor necessárias para o crescimento, os valores mínimo e máximo do índice de área foliar, dentre outras.

Na etapa de edição dos dados de entrada e simulação no SWAT+, o modelo permite alterar as operações de manejo agrícola das culturas a serem executadas em cada HRU. Para o manejo do uso da terra na BHAC, inseriu-se os calendários agrícolas para as culturas de milho (*Zea mays* L.); *soja* (*Glycine max* L.); *aveia preta* (*Avena strigosa* Schreb.); tabaco (*Nicotiana tabacum* L.) e eucalipto (*Eucalyptus globulus*) (Apêndice B). Sendo assim, adotou-se cronogramas predefinidos de acordo com as culturas predominantes na bacia, cujos dados de produção foram adquiridos do Censo Agropecuário do ano base 2017 do IBGE (IBGE, 2022). Informações sobre as datas de plantio e colheita, quantidade de fertilizantes e agrotóxicos utilizados para cada cultura e tipo de sistema de irrigação adotado para as culturas, foram obtidos

junto à EMATER-ASCAR Pelotas, Portarias do Programa Nacional de Zoneamento Agrícola de Risco Climático do Ministério da Agricultura e Pecuária para o Rio Grande do Sul (MAPA, 2023).

Como o SWAT+ considera o cálculo do balanço hídrico de acordo com a Equação 1, considerou-se neste estudo que a precipitação é a única fonte de entrada de água na bacia hidrográfica para a estimativa do balanço hídrico, pois não foi realizado o manejo de irrigação das culturas.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R - Q_{surf} - E_a - ws - Q_{gw}) \quad (1)$$

Em que  $SW_t$  é o teor de água final (mm),  $SW_0$  é o teor de água inicial no dia  $i$  (mm),  $t$  é o tempo (dias),  $R$  é a quantidade de precipitação no dia  $i$  (mm),  $Q_{surf}$  é a quantidade de escoamento superficial no dia  $i$  (mm),  $E_a$  é a quantidade de evapotranspiração no dia  $i$  (mm),  $ws$  é a quantidade de água que entra na zona vadosa no dia  $i$  (mm) e  $Q_{gw}$  é a quantidade de fluxo de retorno no dia  $i$  (mm).

Utilizou-se o filtro automático Base Flow Filter para separação dos escoamentos superficial e de base (Arnold et al., 1995). O filtro foi aplicado aos dados de vazão, disponíveis de 2015 a 2017. Sendo assim, foi possível estimar melhor o fator  $\alpha$ .aqu (Constante de recessão do escoamento de base), utilizado pelo SWAT+ para o cálculo do escoamento de base. O valor de  $\alpha$  encontrado pelo Base Flow Filter foi inserido no SWAT+ como dado de configuração inicial. Foi adotada a equação de Penman-Monteith para estimar a evapotranspiração potencial (PET), o número da curva (CN II) do SCS (USDA - SCS, 1972) para estimar o escoamento superficial e Muskingum Cunge para estimar o roteamento dos canais. Por fim, considerou-se o período de simulação de 6 anos (2012 - 2017) e rodamos o modelo com um período de aquecimento de 3 anos.

De acordo com Acharki et al. (2023), o aquecimento do modelo permite que ele seja executado por um período inicial antes da etapa de calibração e validação, estabelecendo condições hidrológicas iniciais adequadas. Utilizou-se o SWAT+ Toolbox 1.1.0 (Chawanda, 2021) e o R-SWAT+ 4.0 (Nguyen et al., 2022) para comparar o desempenho do modelo SWAT+ compreendendo o período de 01/10/2015 a 31/12/2017 para calibração e de 01/03/2015 a 31/09/2015 para validação dos dados observados de vazão mensal e diária.

### 5.2.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE GLOBAL DOS PARÂMETROS

Para este estudo, realizou-se a análise de sensibilidade global dos parâmetros para a estimativa de vazão em escala mensal e diária, para cada software. A sensibilidade dos parâmetros no software R-SWAT+ foi determinada por meio da aplicação de um sistema de regressão múltipla, em que os parâmetros gerados pela Amostragem Hipercúbica Latina Uniforme (*LHS*) juntamente com um algoritmo de busca global examina o comportamento dos parâmetros com uma função objetivo, denominado de SUFI-2 (Sequential Uncertainty Fitting), esta abordagem é a mesma utilizada pelo SWAT+ CUP (Abbaspour; Johnson; Van Genuchten, 2004). Para a análise de sensibilidade no SWAT+ Toolbox utilizou-se o algoritmo Sobol (Chawanda, 2021).

O algoritmo SUFI-2 fornece classificação dos parâmetros mais sensíveis baseado na sua estimativa que influência na saída do modelo, enquanto o Sobol fornece uma classificação de sensibilidade baseada nas estimativas de cada parâmetro e suas interações entre os demais parâmetros (Mckay; Beckman; Conover, 1979; Sobol, 2001; Zhang; Chu; Fu, 2013). Adotou-se os mesmos parâmetros e o mesmo número de iterações (200 iterações) para ambas as análises de sensibilidade nos softwares R-SWAT+ e SWAT+ Toolbox. Para tal, foram selecionados 19 parâmetros para a vazão mensal e diária, relacionados aos processos de escoamento superficial, evapotranspiração, percolação, recarga, infiltração, solo, etc., assim como seus intervalos foram definidos com base na literatura (Abbaspour et al., 2015; Aquino, 2014; Arnold et al., 2012; Silva et al., 2023; Steinmetz, 2020) e na experiência das modeladoras, dadas as características físicas da BHAC (Tabela 5).

Tabela 5 - Faixas dos valores inferiores e superiores dos parâmetros do SWAT+ selecionados para análise de sensibilidade e calibração para as escalas de tempo mensal e diária em ambos os softwares.

Nome parâmetro	Descrição do parâmetro no SWAT+	Faixa inferior	Faixa superior	Tipo de mudança
bd.sol	Densidade aparente úmida ( $\text{g cm}^{-3}$ )	-25	25	Relativa (porcentagem)
perco.hru	Coeficiente de percolação	0	2	Substituir
flo_min.aqu	Profundidade limite da água no aquífero raso necessário para que ocorra o fluxo de retorno ( $\text{mm H}_2\text{O}$ )	0	50	Substituir
alpha.aqu	Constante de recessão do escoamento de base	0,01	0,9	Substituir
latq_co.hru	Coeficiente número da curva de evapotranspiração da planta	0	1	Substituir
esco.hru	Fator de compensação de evaporação da água no solo	0,6	0,9	Substituir
revap_co.aqu	Coeficiente de "revap" da água subterrânea	0	0,2	Substituir
revap_min.aqu	Limiar de profundidade da água no aquífero raso para que ocorra percolação para o aquífero profundo ( $\text{mm H}_2\text{O}$ )	0	10	Substituir
cn2.hru	Curva-número (CN) para a condição de umidade AMCII	-25	25	Relativa (porcentagem)
ovn.hru	Coeficiente de Manning para fluxo terrestre	-20	20	Relativa (porcentagem)
surlag.bsn	Tempo de retardamento do escoamento superficial direto (dias)	-10	10	Relativa (porcentagem)
awc.sol	Capacidade de água disponível do solo camada ( $\text{mm H}_2\text{O mm solo}^{-1}$ )	-20	20	Relativa (porcentagem)
chn.rte	Coeficiente de Manning para o canal principal	0	0,1	Substituir
lat_ttime.hru	Tempo necessário para o retorno do fluxo lateral (dias)	0	30	Substituir
chk.rte	Condutividade hidráulica efetiva do canal principal ( $\text{mm hr}^{-1}$ )	-10	10	Relativa (porcentagem)
epco.hru	Fator de compensação do consumo de água pelas plantas	0,01	0,5	Substituir
k.sol	Condutividade hidráulica do solo saturado ( $\text{mm hr}^{-1}$ )	-10	10	Relativa (porcentagem)
slope_len.hru	Comprimento médio da encosta (m)	-5	5	Relativa (porcentagem)
slope.hru	Inclinação média da encosta ( $\text{m m}^{-1}$ )	-10	10	Relativa (porcentagem)
canmx.hru	Quantidade máxima de água interceptada pelas plantas ( $\text{mm H}_2\text{O}$ )	0	10	Substituir
lat_len	Comprimento do declive para o fluxo subterrâneo lateral (m)	0	10	Substituir

O coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) foi escolhido como função objetivo no R-SWAT+ por ser o indicador estatístico adotado com maior frequência na modelagem hidrológica (Moravcova et al., 2024). No SWAT+Toolbox não há possibilidade de escolher a função objetivo, mas de acordo com Chawanda (2021), a função NSE é considerada como padrão. O *t-Stat* foi utilizado para identificar a significância relativa de cada parâmetro e, quanto maior o valor absoluto o parâmetro possuir, mais sensível ele será. O *p-valor* determina a significância da sensibilidade e valores próximos de zero indicam os parâmetros mais significativos (Abbaspour et al., 2015). O software SWAT+ Toolbox não informa o *p-valor*, somente o *t-Stat*. Utilizou-se a classificação de van Griensven et al. (2006) para identificar os parâmetros sensíveis (Tabela 6).

Tabela 6 - Classificação do grau de importância dos parâmetros após a análise de sensibilidade.

Ranking do parâmetro	Hierarquia de importância
1	Muito importante
2 - 6	Importante
7 - 14	Ligeiramente importante
≥15	Não importante

Fonte: van Griensven et al., 2006

#### 5.2.4 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO

Para a calibração semiautomática realizada no SWAT+ Toolbox (Chawanda, 2021) utilizou-se o algoritmo Dynamically Dimensioned Search (DDS) e a função objetivo foi o coeficiente de Nash-Sutcliffe, onde estabeleceu-se inicialmente 200 iterações. Para a calibração semiautomática realizada no R-SWAT+ (Nguyen et al., 2022) utilizou-se o algoritmo SUFI-2 que é integrado ao R-SWAT, sendo similar ao SWAT-CUP e a função objetivo escolhida foi o coeficiente de Nash-Sutcliffe. Estabeleceu-se inicialmente 200 iterações. Os parâmetros utilizados para a calibração foram obtidos após a análise de sensibilidade em cada software.

O módulo de autocalibração dos softwares ajusta o modelo SWAT+ ao modificar as combinações de parâmetros até que os valores simulados correspondam aos valores medidos ou até que o número máximo de repetições estipulado seja

atingido (Moravcova et al., 2024). No caso deste estudo, a calibração finalizará quando as 200 iterações ocorrerem, assim, ajustar-se-á os parâmetros na faixa que apresentou um melhor NSE e procede-se uma nova rodada com “n” iterações. As mudanças nos valores dos parâmetros podem ocorrer através de três diferentes operadores: mudança substituir, mudança absoluta e mudança relativa. O software altera o valor do parâmetro da melhor simulação anterior, substituindo-o por um novo valor que esteja dentro dos limites definidos pelo usuário (Substituir); o valor do parâmetro da simulação anterior é multiplicado por um novo valor, também respeitando a faixa de variação estabelecida (Relativo ou percentual) ou o valor do parâmetro é ajustado somando-se a ele um novo valor, dentro dos limites definidos (Absoluto) (Chawanda, 2021; Nguyen et al., 2022). Com esses novos valores, o software realiza uma nova iteração dos parâmetros, com o objetivo de melhorar as estatísticas que medem o desempenho da simulação, como o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS) (Abbaspour, 2015; Arnold et al., 2012).

Para avaliar o desempenho do modelo no SWAT+ Toolbox e no R-SWAT, adotou-se o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) e o Kling-Gupta Efficiency (KGE), de acordo com os critérios de Moriasi et al. (2007) e Thiemiig et al. (2013), respectivamente (Tabela 7). Os autores Brighenti, Bonumá e Chaffe (2016), Nguyen et al. (2022) e Wu e Liu (2012), recomendam utilizar várias métricas para avaliar o desempenho do modelo, porém, para fins de comparação entre os softwares, utilizou-se as métricas NSE e KGE, pois ambos estão disponíveis nos dois softwares. O PBIAS (viés percentual) está disponível no SWAT+ Toolbox, enquanto o aPIAS (viés absoluto) está disponível no R-SWAT, portanto são métricas diferentes que não podem ser comparadas.

Tabela 7 - Critérios de avaliação de desempenho do modelo hidrológico SWAT+ e faixa dos valores de variação, de acordo com os coeficientes de Nash-Sutcliffe (NSE) e Kling-Gupta Efficiency (KGE).

Coeficiente	Critérios de avaliação de desempenho do modelo				Faixa
	Muito Bom	Bom	Satisfatório	Insatisfatório	
NSE	$NSE > 0,8$	$0,70 < NSE \leq 0,8$	$0,5 < NSE \leq 0,7$	$NSE \leq 0,5$	-1 a 1
KGE	$KGE > 0,75$	$0,50 < KGE \leq 0,75$	$0,0 < KGE \leq 0,50$	$KGE \leq 0,0$	$-\infty$ a 1

Moriasi et al. (2007) e Thiemiig et al. (2013)

### 5.2.5 ANÁLISE DE INCERTEZAS

A análise de incertezas realizada no R-SWAT adota o método SUFI-2, fundamentado em uma abordagem Bayesiana, a qual avalia incertezas por meio de um processo de ajuste sequencial (Abbaspour; Johnson; Van Genuchten, 2004; Nguyen et al., 2022). Nesse contexto, as incertezas nos parâmetros são consideradas a partir de todas as fontes de incerteza, como as entradas do modelo, sua estrutura, os parâmetros específicos do modelo e os dados observados (Khoi et al., 2017). O SUFI-2 combina otimização com análise de incertezas, utilizando um método de pesquisa global e gerenciando vários parâmetros por meio da amostragem por Hipercubo Latino (Abbaspour; Johnson; Van Genuchten, 2004).

A extensão da consideração de todas as incertezas é medida pelo *fator p*, que representa a proporção de dados observados que se enquadram na faixa de 95% de incerteza de previsão (95PPU) (Abbaspour; Johnson; Van Genuchten, 2004). Este intervalo é calculado nos percentis de 2,5% e 97,5% da distribuição acumulada das variáveis de saída (Rostamian et al., 2008). Além disso, o *fator r*, que mede a precisão da análise de incerteza, é determinado pela espessura média da faixa 95PPU dividida pelo desvio padrão dos dados medidos. O *fator p* pode variar de 0 a 100%, enquanto o *fator r*, pode variar de 0 ao infinito (Abbaspour; Johnson; Van Genuchten, 2004). A simulação ideal, com um *fator p* igual a 1 e um *fator r* igual a zero, indicaria uma correspondência perfeita com os dados observados, porém *fator p* > 0,7 e *fator r* < 1,5 é satisfatório (Abbaspour, 2015). Não há informação de como o SWAT+ Toolbox realiza a análise de incertezas, pois segundo o material disponível pelo desenvolvedor (<https://celray.github.io/docs/swatplus-toolbox/v1.0/index.html>), não há menção aos algoritmos utilizados para estas análises, portanto não foi avaliado neste estudo.

## 5.3 Resultados e Discussão

### 5.3.1 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE GLOBAL

#### 5.3.1.1 Sensibilidade global para vazão mensal

Os resultados da análise de sensibilidade global para a variável vazão mensal, realizada pela ferramenta R-SWAT são apresentados na Tabela 8. O foco desta interpretação recai sobre os 10 primeiros parâmetros mais sensíveis e os dois menos influentes, conforme os valores de *t-Stat* e *p-valor*.

Tabela 8 - Análise de sensibilidade mensal para a variável vazão no software R-SWAT.

Nome parâmetro	<i>t-Stat</i> absoluto	<i>p-valor</i>	Hierarquia segundo Van Griensven <i>et al.</i> (2006)
alpha.aqu	8,424	<i>p-valor</i> < 0,001	Muito importante
cn2.hru	8,421		
revap_min.aqu	6,77		
chn.rte	2,28	0,02	Importante
flo_min.aqu	1,82	0,07	
bd.sol	1,66	0,10	Ligeiramente importante
lat_len.hru	1,17	0,24	
slope.hru	1,07	0,29	
lat_ttime.hru	1,04	0,30	
revap_co.aqu	1,02	0,31	
slope_len.hru	0,94	0,35	
awc.sol	0,86	0,39	
esco.hru	0,70	0,48	
surlag.bsn	0,56	0,57	
k.sol	0,54	0,59	
chk.rte	0,32	0,75	Não importante
lat_co.hru	0,26	0,79	
perco.hru	0,25	0,81	
ovn.hru	0,14	0,89	
epco.hru	0,13	0,90	
canmx.hru	0,11	0,95	

O parâmetro  $\alpha.aqu$ , que representa a constante de recessão do escoamento de base, apresentou um  $t$ -Stat absoluto de 8,424 e um  $p$ -valor  $< 0,001$ , indicando sua alta significância. De acordo com a classificação de Van Griensven *et al.* (2006), esse parâmetro se enquadra na categoria de "Muito importante", o que significa que ele exerce uma alta influência sobre os resultados do modelo. O valor significativo do  $t$ -Stat também reforça sua relevância, sugerindo que variações em  $\alpha.aqu$  podem ter um impacto significativo na simulação da vazão. Outro parâmetro que se destacou foi o  $cn2.hru$ , com praticamente o mesmo  $t$ -Stat absoluto de 8,421, o que também o classificaria como "Muito importante". O  $cn2.hru$ , que se refere ao número da curva para a condição de umidade II do solo, é fundamental na determinação do escoamento superficial e sua alta significância indica que ele é um dos principais controladores do processo hidrológico modelado pelo SWAT+. O parâmetro  $revap\_min.aqu$ , com um  $t$ -Stat absoluto de 6,77, também se mostra significativo, sendo classificado como "Importante" pela classificação de Van Griensven *et al.* (2006). Esse parâmetro, que representa o limiar de profundidade da água no aquífero raso para que ocorra percolação para o aquífero profundo, influencia o movimento da água subterrânea.

Por outro lado, parâmetros como o  $chn.rte$  (coeficiente de Manning para o canal principal) também mostrou significância estatística com um  $p$ -valor de 0,02 e seu  $t$ -Stat absoluto de 2,28 o classificou como o quarto parâmetro mais importante. Esse parâmetro é essencial para a modelagem do escoamento no canal principal, pois influencia na rugosidade do canal, afetando a velocidade e volume do escoamento (Neitsch *et al.*, 2011). Porém, sua influência é menos pronunciada em comparação aos parâmetros mencionados anteriormente, devido à natureza específica de cada um desses parâmetros e como eles interagem com o modelo SWAT+ através de interações mais diretas com o ciclo hidrológico e o escoamento superficial (van Griensven *et al.*, 2006; Wei *et al.*, 2022; Zhao *et al.*, 2018).

Os parâmetros  $flo\_min.aqu$  (profundidade limite da água no aquífero raso para fluxo de retorno) e  $bd.sol$  (densidade aparente úmida do solo) apresentaram  $t$ -Stat absoluto de 1,82 e 1,66, respectivamente, com  $p$ -valor de 0,07 e 0,10. Esses resultados sugerem que, eles apresentam uma influência um pouco menor que o  $chn.rte$ . Outros parâmetros, como  $lat\_len.hru$ ,  $slope.hru$ ,  $lat\_ttime.hru$  e  $revap\_co.aqu$

mostraram *t-Stat* absoluto inferior e *p-valor* mais elevados, indicando que são menos influentes no modelo, embora sejam considerados como ligeiramente importante. Parâmetros como o *epco.hru* com *t-Stat* de 0,13 e *p-valor* de 0,90 e o *canmx.hru*, com *t-Stat* de 0,11 e *p-valor* de 0,95 indicam pouca ou nenhuma significância estatística, sugerindo que a influência sobre a vazão simulada é praticamente nula.

Os resultados apresentados na Tabela 8 evidenciam que a sensibilidade dos parâmetros para a bacia é influenciada, especialmente, por variáveis relacionadas às variáveis de fluxo de água subterrânea, como *a*, *alpha.aqu*, *revap\_min.aqu*, *flo\_min.aqu* e *revap\_co.aqu*, com variáveis relacionadas ao escoamento superficial e infiltração como *cn2.hru* e *bd.sol*, *lat\_len.hru*, *slope.hru* e *lat\_ttime.hru* e por fim, o parâmetro *chn.rte* relacionado ao canal principal são os parâmetros sensíveis para a bacia conforme a importância de cada um dos fatores.

Os resultados da análise de sensibilidade para vazão mensal no SWAT+ Toolbox são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Análise de sensibilidade mensal para a variável vazão no software SWAT+ Toolbox.

Nome parâmetro	<i>t-Stat</i> absoluto	Hierarquia segundo Van Griensven <i>et al.</i> (2006)
<i>alpha.aqu</i>	0,960	Muito importante
<i>revap_min.aqu</i>	0,077	
<i>bd.sol</i>	0,061	
<i>k.sol</i>	0,028	Importante
<i>esco.hru</i>	0,008	
<i>lat_ttime.hru</i>	0,007	
<i>cn2.hru</i>	0,007	
<i>slope.hru</i>	0,004	
<i>chn.rte</i>	0,004	
<i>awc.sol</i>	0,002	Ligeiramente importante
<i>revap_co.aqu</i>		
<i>flo_min.aqu</i>		
<i>slope_len.hru</i>		
<i>surlag.bsn</i>		
<i>lat_len.hru</i>		
<i>ovn.hru</i>	<i>t-Stat</i> < 0,002	
<i>latq_co.hru</i>		
<i>epco.hru</i>		Não importante
<i>perco.hru</i>		
<i>chk.rte</i>		
<i>canmx.hru</i>		

A análise de sensibilidade realizada para a vazão mensal utilizando o SWAT+ toolbox, por meio do algoritmo Sobol, indicou que o parâmetro  $\alpha.aqu$  é o mais sensível, com um  $t-Stat$  de 0,960, demonstrando sua alta influência na dinâmica das águas subterrâneas. Este parâmetro controla a taxa de recessão do escoamento de base no aquífero raso, o que determina a contribuição do fluxo subterrâneo para os cursos d'água, especialmente durante períodos sem precipitação (Neitsch et al., 2011). O segundo parâmetro mais sensível é  $revap\_min.aqu$ , com  $t-Stat$  de 0,077. Este parâmetro controla o movimento da água do aquífero raso para o aquífero profundo, impactando a recarga de aquíferos e, conseqüentemente, o fluxo de base. A dominância dos parâmetros relacionados ao fluxo subterrâneo na análise de sensibilidade nos dois softwares confirma a importância das águas subterrâneas na modelagem da bacia estudada (Abbaspour et al., 2015).

O parâmetro  $bd.sol$ , com  $t-Stat$  de 0,061, ocupa a terceira posição em termos de sensibilidade. Segundo Worqlul et al. (2017), esse parâmetro influencia diretamente a infiltração da água e o escoamento superficial, uma vez que solos mais compactos tendem a reduzir a capacidade de infiltração, aumentando o escoamento superficial. Sua posição elevada na análise reflete a importância da estrutura do solo na dinâmica hídrica. O  $k.sol$ , com  $t-Stat$  de 0,028, e  $esco.hru$ , com  $t-Stat$  de 0,008, seguem abaixo na lista de sensibilidade classificados como importantes. O parâmetro  $k.sol$  (condutividade hidráulica do solo saturado) está relacionado à facilidade com que a água se movimenta através dos poros do solo, afetando tanto a infiltração quanto a recarga das águas subterrâneas (Wu et al., 2022). Já o  $esco.hru$ , por sua vez, regula a taxa de evaporação da água no solo, influenciando a quantidade de água disponível para infiltração e escoamento (Neitsch et al., 2011).

Os parâmetros  $lat\_ttime.hru$  e  $cn2.hru$  ambos com  $t-Stat$  de 0,007, destacam-se em seguida. O  $lat\_ttime.hru$  afeta o tempo de resposta do fluxo lateral às precipitações, influenciando o regime de fluxo nos cursos d'água (Neitsch et al., 2011). Já o parâmetro  $cn2.hru$  está intimamente ligado à capacidade de infiltração da água no solo e ao escoamento superficial, sendo importante para a modelagem de eventos de precipitação e escoamento (Wu et al., 2022).

O parâmetro  $slope.hru$  e  $chn.rte$  ambos com  $t-Stat$  de 0,004, ocupam a oitava e nona posição no ranking, sendo classificados como ligeiramente importantes. O  $slope.hru$  influencia a taxa de escoamento superficial e o potencial erosivo das

encostas, enquanto o *chn.rte* afeta a velocidade e o volume de escoamento no canal principal, determinando a resistência ao fluxo no canal (Brighenti; Bonumá; Chaffe, 2016). De acordo com Cibin, Sudheer e Chaubey (2010), em bacias hidrográficas onde o relevo é fortemente acidentado, o parâmetro *slope.hru* pode ser mais sensível, porém, na BHAC o relevo não apresenta estas características, por isso não apresentou elevada sensibilidade. Por fim, o parâmetro *awc.sol* é o décimo parâmetro mais sensível com *t-Stat* de 0,002. Este parâmetro reflete a capacidade do solo de reter água disponível para as plantas, sendo um fator determinante na evapotranspiração e no balanço hídrico (Neitsch et al., 2011). Os dois parâmetros menos sensíveis, *revap\_co.aqu* e *flo\_min.aqu*, apresentaram *t-Stat* inferior a 0,002, indicando uma influência menor no modelo. Embora esses parâmetros também estejam relacionados ao fluxo de água subterrânea, sua baixa sensibilidade sugere que, para a escala mensal, outras variáveis têm um impacto mais significativo no comportamento hidrológico da BHAC.

Andrade et al. (2017), verificaram que o parâmetro *cn2.hru* foi o que apresentou maior sensibilidade, porém no presente estudo este parâmetro com SWAT+ Toolbox, mostrou-se com menor influência sobre a vazão mensal, diferença possivelmente relacionada também ao intervalo inicial utilizado para análise do parâmetro. Além disso, a interação complexa entre os diferentes parâmetros do modelo e suas relações com o comportamento hidrológico da bacia hidrográfica trabalhada (BHAC) podem resultar em efeitos compensatórios, nos quais as mudanças em um parâmetro são mitigadas por ajustes em outros, podendo levar à aparente falta de influência de alguns parâmetros quando analisados individualmente (Daggupati et al., 2015). Em alguns casos, parâmetros relacionados a processos específicos, como o fluxo de água subterrânea, podem apresentar baixa sensibilidade em determinadas bacias hidrográficas ou períodos de análise (Alipour; Hosseini, 2018; Hosseini; Khaleghi, 2020).

### 5.3.1.2 Sensibilidade global para vazão diária

Os resultados da análise de sensibilidade para a vazão diária no R-SWAT são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Análise de sensibilidade diária para a variável vazão no software R-SWAT.

Nome parâmetro	<i>t-Stat</i> absoluto	<i>p-valor</i>	Hierarquia segundo Van Griensven <i>et al.</i> (2006)
alpha.aqu	57,98		Muito importante
bd.sol	11,48	<i>t-Stat</i> <0,001	
cn2.hru	5,22		
awc.sol	1,86	0,064	Importante
flo_min.aqu	1,73	0,085	
surlag.bsn	1,67	0,096	
chk.rte	1,35	0,179	
k.sol	1,08	0,280	
esco.hru	1,03	0,305	
slope.hru	0,69	0,494	
chn.rte	0,66	0,508	Ligeiramente importante
revap_min.aqu	0,66	0,508	
perco.hru	0,62	0,535	
lat_ttime.hru	0,39	0,695	
lat_len.hru	0,34	0,732	
slope_len.hru	0,28	0,783	
revap_co.aqu	0,25	0,805	
ovn.hru	0,20	0,844	Não importante
canmx.hru	0,05	0,963	
latq_co.hru	0,06	0,976	
epco.hru	0,06	0,984	

Com relação à análise de sensibilidade global, para dados diários de vazão utilizando o R-SWAT e o algoritmo SUFI-2 os resultados indicam uma forte predominância do parâmetro alpha.aqu (constante de recessão do escoamento de base), que apresenta um *t-Stat* absoluto de 57,98, sendo o mais significativo entre os parâmetros avaliados, com um *p-valor* inferior a 0,001. A sensibilidade extrema de alpha.aqu reflete a importância das águas subterrâneas na regulação do fluxo de base na bacia estudada também na escala diária. O segundo parâmetro mais significativo é o bd.sol, com um *t-Stat* de 11,48, que demonstra uma relevância significativa, pois também apresenta valor-p < 0,001. O terceiro parâmetro mais sensível foi cn2.hru, que apresenta um *t-Stat* de 5,22 e *p-valor* < 0,001. Os parâmetros awc.sol, flo\_min.aqu

e *surlag.bsn* apresentam *t-Stat* de 1,86, 1,73 e 1,67 e *p-valor* de 0,064, 0,085 e 0,096, respectivamente.

O parâmetro *chk.rte* apresenta um *t-Stat* de 1,35 e um *p-valor* de 0,179, indicando uma importância menor na modelagem da vazão (ligeiramente importante). Os parâmetros *k.sol*, *esco.hru*, *slope.hru* apresentam respectivamente *t-Stat* de 1,08, 1,03 e 0,69 e um *p-valor* de 0,280, 0,305 e 0,494. Por outro lado, os dois parâmetros menos influentes, *epco.hru* (fator de compensação do consumo de água pelas plantas) e *latq\_co.hru* (coeficiente número da curva de evapotranspiração da planta), apresentaram *t-Stat* muito baixos, de 0,06 e *p-valor* mais elevados de 0,984 e 0,976, respectivamente.

Esses resultados indicam que, na escala diária, a influência desses parâmetros sobre a vazão é praticamente insignificante, sugerindo que o impacto da evapotranspiração e do consumo de água pelas plantas é menos relevante no curto prazo em comparação com os processos de escoamento superficial e infiltração da água no solo (Abbaspour, 2015; Alemayehu et al., 2020). A Tabela 11 apresenta a análise de sensibilidade para a vazão diária através do SWAT+ Toolbox.

Tabela 11 - Análise de sensibilidade para a variável vazão em escala diária no software SWAT+ Toolbox.

Nome parâmetro	<i>t-Stat</i> absoluto	Hierarquia segundo Van Griensven <i>et al.</i> (2006)
flo_min.aqu	0,810	Muito importante
k.sol	0,200	
alpha.aqu	0,148	
surlag.bsn	0,065	Importante
cn2.hru	0,024	
revap_min.aqu	0,017	
esco.hru	0,013	
bd.sol	0,009	
slope.hru	0,005	
lat_ttime.hru	0,004	Ligeiramente importante
chk.rte	0,003	
perco.hru	0,002	
revap_co.aqu	0,001	
slope_len.hru		
awc.sol		
lat_len.hru		
ovn.hru	<i>t-Stat</i> <0,001	
lat_co.hru		Não importante
epco.hru		
chn.rte		
canmx.hru		

Para o SWAT+ Toolbox utilizando o Sobol para análise da vazão diária, o parâmetro flo\_min.aqu foi considerado o mais sensível com um valor de *t-Stat* de 0,810. Este parâmetro determina a profundidade mínima da água no aquífero raso necessária para que ocorra o fluxo de retorno à superfície (Neitsch et al., 2011). O parâmetro k.sol apresenta um valor de *t-Stat* igual a 0,200, indicando uma importante influência na modelagem. Solos com maior condutividade facilitam a infiltração e a recarga dos aquíferos, enquanto solos com baixa condutividade hidráulica aumentam o escoamento superficial (Moravcova et al., 2024). De acordo com Silva et al. (2023) solos arenosos mostraram-se mais sensíveis à calibração, pois permitem uma rápida infiltração e elevada condutividade hidráulica do solo saturado. O terceiro parâmetro mais significativo foi alpha.aqu, com um valor de *t-Stat* igual a 0,148 o qual controla a taxa de recessão do escoamento base no aquífero raso. O surlag.bsn é o quarto parâmetro considerado importante pela classificação de *t-Stat* (0,065) e está relacionado ao tempo de retardamento do escoamento superficial direto. Este

parâmetro afeta o tempo necessário para que a água alcance os cursos d'água após uma chuva (Neitsch et al., 2011). Diferente da análise de sensibilidade com o R-SWAT, o  $cn2.hru$ , é o quinto parâmetro mais sensível no SWAT+ Toolbox com um valor de  $t$ -Stat igual a 0,024.

A diferença nos parâmetros de sensibilidade entre as análises de vazão mensal e diária se deve à forma como os processos hidrológicos operam em diferentes escalas temporais e à maneira como esses processos influenciam a vazão de maneira cumulativa ou imediata (Koltsida; Kallioras, 2022). Na escala diária, os parâmetros que capturam respostas rápidas, como o escoamento superficial e a reação imediata a chuvas, são mais sensíveis, enquanto na escala mensal, os parâmetros relacionados a processos de longo prazo, como a evapotranspiração e o fluxo de base, ganham importância ao integrar os efeitos acumulados ao longo do mês (Koltsida; Kallioras, 2022). No entanto, é importante observar que a sensibilidade dos parâmetros do modelo depende de vários fatores, incluindo as características específicas da bacia hidrográfica, as condições climáticas e a qualidade e quantidade dos dados de entrada disponíveis (Hollaway et al., 2018).

A análise comparativa dos resultados de sensibilidade mensal entre os softwares R-SWAT e SWAT+ Toolbox, considerando o algoritmo Sobol para o SWAT+ Toolbox, revela nuances importantes na identificação da relevância dos parâmetros, refletindo as diferenças fundamentais entre o SUFI-2 do R-SWAT. Essas diferenças são essenciais para compreender como cada software modela a vazão mensal e podem ser atribuídas às características distintas dos métodos de análise de sensibilidade que cada abordagem emprega (Abbas et al., 2024).

No R-SWAT, o parâmetro  $alpha.aqu$ , com uma significância estatística elevada, revela uma forte dependência da modelagem da vazão mensal nas características do escoamento de base. Esse parâmetro controla a taxa de recessão do fluxo subterrâneo e sua alta sensibilidade, evidenciada pelo  $t$ -Stat elevado, sugere que o modelo do R-SWAT atribui uma importância significativa à dinâmica das águas subterrâneas para a simulação da vazão mensal. A abordagem de amostragem aleatória estratificada do LHS, empregada pelo R-SWAT, é eficaz para explorar a variabilidade dos parâmetros e capturar a resposta do modelo, o que pode explicar a predominância de  $alpha.aqu$  na análise.

O parâmetro *cn2.hru* também apresenta um *t-Stat* elevado e próximo ao de *alpha.aqu*, indicando a relevância do número da curva na determinação do escoamento superficial. A sensibilidade significativa de *cn2.hru* sugere que a modelagem do escoamento superficial e a capacidade de infiltração desempenham papéis decisivos na dinâmica da água na BHAC, o que é bem capturado pela abordagem SUFI-2 do R-SWAT. Por outro lado, o SWAT+ Toolbox, que utiliza o algoritmo Sobol para análise de sensibilidade, demonstra uma abordagem diferente. O método Sobol é baseado na decomposição da variância e permite avaliar a importância dos parâmetros de maneira mais abrangente, considerando interações entre os parâmetros e suas contribuições marginais para a variância total (Tolson; Shoemaker, 2007). A menor sensibilidade observada para *alpha.aqu* no SWAT+ Toolbox, em comparação com o R-SWAT, sugere que o algoritmo Sobol pode não capturar com a mesma precisão as variações mais sutis no escoamento de base. Isso pode ser atribuído ao fato de que o Sobol realiza uma análise mais detalhada das interações entre parâmetros e pode diluir a importância de parâmetros que têm efeitos altamente variáveis em contextos específicos (Uliana et al., 2019).

A diferença observada na sensibilidade do parâmetro *revap\_min.aqu* também é significativa. No R-SWAT, *revap\_min.aqu* mostra uma influência substancial, refletindo o papel do limiar de profundidade da água no aquífero raso para a percolação. Em contraste, no SWAT+ Toolbox, a menor sensibilidade para este parâmetro pode indicar que o método Sobol pode capturar a influência detalhada deste parâmetro, possivelmente devido à sua abordagem de análise de variância mais ampla (Zhang; Chu; Fu, 2013). Além disso, a menor importância atribuída ao parâmetro *bd.sol* no SWAT+ Toolbox, comparado com sua influência significativa no R-SWAT, sugere uma diferença na forma como cada método avalia a estrutura do solo. O algoritmo Sobol pode estar capturando interações complexas envolvendo densidade do solo que afetam sua sensibilidade quando analisado pelo SUFI-2 (Nguyen et al., 2022; Zhang; Chu; Fu, 2013).

A comparação entre os resultados da análise de sensibilidade para vazão diária obtidos pelo R-SWAT utilizando o algoritmo SUFI-2 e pelo SWAT+ Toolbox utilizando o algoritmo Sobol revela algumas diferenças quanto ao grau de importância dos parâmetros e sugere implicações distintas sobre os processos hidrológicos mais importantes em cada abordagem. No R-SWAT, o parâmetro *alpha.aqu* foi o mais

sensível. Esse resultado destaca a extrema sensibilidade da vazão diária às variações na taxa de recessão do escoamento de base. O *bd.sol* (densidade aparente do solo) e o *cn2.hru* também são destacados como importantes. Esses parâmetros refletem a importância da capacidade de infiltração da água e a influência do uso do solo sobre o escoamento superficial.

Por outro lado, no SWAT+ Toolbox, o *flo\_min.aqu* é identificado como o parâmetro mais sensível. Isso sugere que, conforme a análise com o algoritmo Sobol, a profundidade mínima para a percolação tem um impacto considerável na modelagem da vazão diária. O *k.sol* é o segundo parâmetro mais importante com a análise realizada com SWAT+ Toolbox, destacando o papel da condutividade hidráulica do solo saturado na infiltração da água e recarga dos aquíferos. Já o parâmetro *alpha.aqu* é o terceiro parâmetro significativo, confirmando a relevância do escoamento base, embora com menor ênfase em comparação ao R-SWAT.

Quando se considera a modelagem da vazão diária, a análise de sensibilidade com o método SUFI-2 do R-SWAT destaca a importância do escoamento de base e da capacidade de infiltração, sugerindo que a regulação das águas subterrâneas e a infiltração são fundamentais. Em contraste, o método Sobol do SWAT+ Toolbox identifica a profundidade mínima para fluxo de retorno e a condutividade hidráulica do solo saturado como parâmetros de maior importância, enfatizando o papel do fluxo subterrâneo e das propriedades do solo na determinação da vazão.

Essas diferenças refletem as abordagens distintas dos algoritmos SUFI-2 e Sobol na análise de sensibilidade. Enquanto o SUFI-2 se diferencia ao combinar a análise de sensibilidade com a calibração e a incerteza, explorando o espaço e ajustando os parâmetros enquanto leva em conta o impacto conjunto de diversos fatores (Bayat; Alizadeh; Mojaradi, 2023), o Sobol oferece uma análise de sensibilidade global mais detalhada, examinando os efeitos individuais e interações de parâmetros, quantificando essas influências por meio da decomposição da variância (Sobol, 2001; Zhang; Chu; Fu, 2013).

### 5.3.2 CALIBRAÇÃO, VALIDAÇÃO E ANÁLISE DE INCERTEZAS DO MODELO SWAT+

Para a calibração mensal e diária com ambos os softwares (R-SWAT e SWAT+ toolbox) foram selecionados os dez parâmetros mais sensíveis, e os melhores valores para cada parâmetro selecionado pode ser verificado na Tabela 12.

Tabela 12 - Resultado da calibração mensal e diária com R-SWAT e SWAT+ Toolbox.

Nome parâmetro	Descrição do parâmetro no SWAT+	R-SWAT		SWAT+ Toolbox	
		Mensal	Diária	Mensal	Diária
alpha.aqu	Constante de recessão do escoamento de base	0,259	0,81	0,20	0,02
awc.sol	Capacidade de água disponível do solo na camada (mm H <sub>2</sub> O mm solo <sup>-1</sup> )		0,09	-24,99	
bd.sol	Densidade aparente úmida (g cm <sup>-3</sup> )	-25,00	-4,00	-9,20	-19,91
chk.rte	Condutividade hidráulica efetiva do canal principal (mm hr <sup>-1</sup> )		0,044		
chn.rte	Coefficiente de Manning para o canal principal	0,098		8,28	
cn2.hru	Curva-número (CN) para a condição de umidade AMCII	24,60	20,60	24,91	24,713
esco.hru	Fator de compensação de evaporação da água no solo		0,671	0,60	0,696
flo_min.aqu	Profundidade limite da água no aquífero raso necessário para que ocorra o fluxo de retorno (mm H <sub>2</sub> O)	22,99	19,709		12,502
k.sol	Condutividade hidráulica do solo saturado (mm hr <sup>-1</sup> )		16,6	-2,54	-10,361
lat_len .hru	Comprimento do declive para o fluxo subterrâneo lateral (m)	4,98			
lat_ttime.hru	Tempo necessário para o retorno do fluxo lateral (dias)	29,545		28,56	0,395
revap_co.aqu	Coefficiente de "revap" da água subterrânea	0,087			
revap_min.aqu	Limiar de profundidade da água no aquífero raso para que ocorra percolação para o aquífero profundo (mm H <sub>2</sub> O)	0,988		0,138	2,593
slope.hru	Inclinação média da encosta (m m <sup>-1</sup> )	4,90	9,60	1,36	3,519
surlag.bsn	Tempo de retardamento do escoamento superficial direto (dias)		13,95		1,98

As diferenças entre os dois métodos de calibração são identificadas através da avaliação dos hidrogramas pela interpretação visual e coeficientes estatísticos (NSE e KGE). O software R-SWAT precisou para a vazão mensal de 7 rodadas com 200 iterações cada para conseguir uma calibração satisfatória (total 1400 iterações). Enquanto o SWAT+ Toolbox necessitou de 6 rodada de 200 iterações para obter um

desempenho satisfatório (1200 iterações). Já para a vazão diária, o R-SWAT precisou de 6 rodadas de 200 iterações (1200 iterações) e o SWAT+ Toolbox precisou de 4 rodadas, totalizando 800 iterações. O tempo computacional para cada iteração durante a calibração do R-SWAT (3 dias) foi mais rápido que com o SWAT+ Toolbox (4,5 dias). Utilizando um computador Intel Core i5-7400 com 4 núcleos de 16 GB de memória RAM e 1 TB de armazenamento. De acordo com Harifidy et al. (2024) e Nguyen et al. (2022), o R-SWAT escreve os arquivos dos parâmetros apenas uma única vez, reduzindo o tempo de processamento computacional quando comparado ao SWAT+ toolbox.

### 5.3.2.1 Vazão mensal

Na comparação entre os resultados da calibração para vazão mensal utilizando o R-SWAT e o SWAT+ Toolbox, observou-se diferenças tanto na eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) quanto no coeficiente de Kling-Gupta (KGE) (Tabela 13).

Tabela 13 - Indicadores estatísticos que descrevem os resultados de calibração e validação do modelo SWAT+ para vazão nos softwares R-SWAT e SWAT+ Toolbox.

Nome parâmetro	Calibração				Validação			
	R-SWAT		SWAT+ Toolbox		R-SWAT		SWAT+ Toolbox	
	Mensal	Diária	Mensal	Diária	Mensal	Diária	Mensal	Diária
NSE	0,57	0,68	0,69	0,67	0,44	0,62	0,51	0,74
KGE	0,71	0,66	0,78	0,52	0,46	0,51	0,54	0,78

NSE: Nash-Sutcliffe; KGE: Kling-Gupta Efficiency

O R-SWAT, utilizando o algoritmo SUFI-2, apresentou um NSE de 0,57 sendo considerado como satisfatório e um KGE de 0,71 (Bom) durante a calibração mensal. Estes valores indicam um desempenho moderado do modelo, com o NSE apontando para uma capacidade razoável do modelo em reproduzir as condições observadas de vazão, e o KGE refletindo uma boa correlação entre as vazões simuladas e observadas. Por outro lado, o SWAT+ Toolbox, que emprega o algoritmo DDS (Dynamically Dimensioned Search), obteve resultados superiores na calibração mensal, com um NSE de 0,69 (Satisfatório) e um KGE de 0,78 (Muito bom). Esses valores sugerem que o SWAT+ Toolbox proporcionou um ajuste mais preciso do

modelo às condições observadas, especialmente quando se considera o valor do KGE, que é consideravelmente maior em comparação com o R-SWAT. Isso implica que o DDS conseguiu capturar melhor a dinâmica hidrológica do sistema, ajustando de maneira mais eficiente os parâmetros do modelo para otimizar a previsão da vazão mensal (N'guessan et al., 2023).

A superioridade do SWAT+ Toolbox na calibração mensal pode ser atribuída à maior capacidade do algoritmo DDS de explorar o espaço de parâmetros de forma mais eficaz, o que é especialmente importante em modelos hidrológicos complexos como o SWAT+ (Tolson; Shoemaker, 2007). Essa comparação evidencia que, para a escala de tempo mensal, o SWAT+ Toolbox, com o algoritmo DDS, oferece uma vantagem na calibração do modelo SWAT+, demonstrando maior precisão na simulação das vazões, em comparação com o R-SWAT e seu algoritmo SUFI-2 (Tolson; Shoemaker, 2007; Yen et al., 2014).

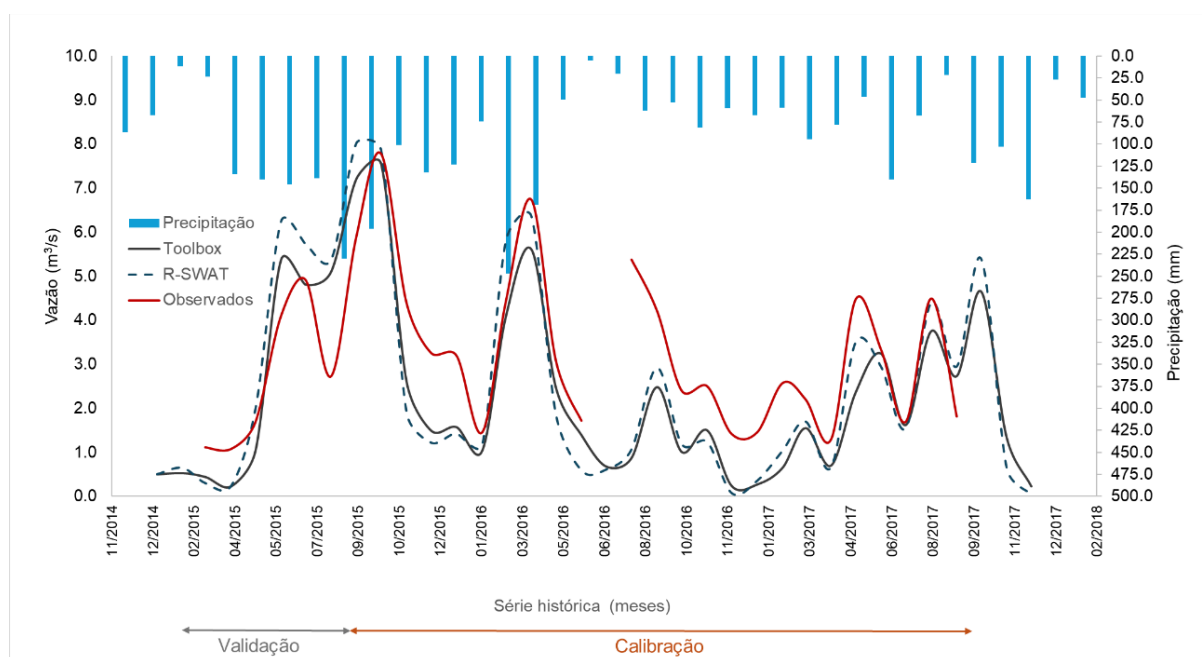
Durante a validação mensal, o R-SWAT apresentou um NSE de 0,44 (Insatisfatório) e um KGE de 0,46 (Satisfatório), enquanto o SWAT+ Toolbox melhorou significativamente, alcançando um NSE de 0,51 (Satisfatório) e um KGE de 0,54 (Bom). Embora ambos os softwares tenham mostrado um desempenho inferior na validação em comparação à calibração, o SWAT+ Toolbox ainda se destacou, indicando que a calibração realizada com este software resultou em um modelo mais robusto. N'guessan et al. (2023), obtiveram resultados semelhantes a este estudo, ao verificar que o NSE na calibração foi melhor que na validação com o SWAT+ Toolbox, sendo que, o DDS convergia rapidamente para o melhor valor e estabilizava.

Os resultados do NSE (*Nash-Sutcliffe Efficiency*) geralmente são inferiores aos do KGE (*Kling-Gupta Efficiency*) devido às diferenças em como esses indicadores são calculados e o que eles representam. O NSE é um índice que mede a eficiência de um modelo em relação à média das observações, focando principalmente na correlação entre os valores simulados e observados (Nash; Sutcliffe, 1970). Ele é sensível a outliers e pode ser severamente afetado por desvios significativos, o que pode resultar em valores mais baixos quando o modelo não captura bem esses extremos (Mathevet et al., 2023).

Entretanto, o KGE é uma métrica mais abrangente que considera três componentes: a correlação entre os dados simulados e observados, a relação entre suas médias e a relação entre suas variâncias (Gupta et al., 2009). Essa abordagem

multifacetada permite que o KGE forneça uma avaliação mais equilibrada do desempenho do modelo, sendo menos suscetível a influências extremas. No estudo de Mathevet et al. (2023), que objetivou desenvolver e introduzir uma nova ferramenta de diagnóstico para avaliar o desempenho de modelos hidrológicos, os resultados mostraram que os modelos hidrológicos calibrados com a função objetivo KGE tiveram melhor desempenho em termos de precisão na representação da vazão, especialmente ao serem avaliados com NSE. A Tabela 13 apresenta o hidrograma mensal com o R-SWAT, SWAT+ Toolbox e dados observados.

Figura 19 - Precipitação mensal e Vazão mensal simulada pelos softwares R-SWAT e SWAT+ Toolbox e vazão observada para a bacia do arroio Cadeia.



A relação entre a precipitação e a vazão demonstram que os picos de vazão geralmente ocorrem após eventos de precipitação intensa, o que é esperado em sistemas hidrológicos (Tolera; Chung; Chang, 2018). A magnitude dos picos de vazão simulados pelo modelo SWAT+ calibrado com o R-SWAT parece estar bem correlacionada com os picos de vazão observados, inclusive coincidindo com o pico de vazão em 08/2017. No entanto, há uma superestimativa da vazão em alguns momentos, indicando que o modelo pode não estar capturando completamente a complexidade dos processos hidrológicos. Já a simulação realizada pelo SWAT+ Toolbox parece apresentar um ajuste inferior, ao observar o hidrograma e compará-lo

aos dados observados, subestimando os picos de vazão. Embora a simulação da vazão com o SWAT+ Toolbox se aproxime melhor dos maiores picos de vazão (05/2015 e 09/2015). Isso sugere que o algoritmo DDS, nesse caso, foi mais eficiente na calibração do modelo que o R-SWAT.

Com relação ao fluxo de base, ambos os modelos subestimaram a vazão. Sendo o SWAT + Toolbox minimamente superior ao R-SWAT, pois coincidiu com os dados observados uma vez (07/2018). Como pode-se observar na Figura 19, pela análise visual os resultados na calibração vão de encontro aos encontrados pelas estatísticas, em que o SWAT+ Toolbox foi superior ao R-SWAT. Na vazão de pico, o R-SWAT também apresentou um desempenho inferior ao Toolbox. Harifidy et al. (2024), identificaram que tanto o SWAT+ Toolbox como o R-SWAT não conseguiram prever satisfatoriamente as vazões de pico nas bacias de Mahajamba, Onilahy e Mandrare, onde os dados do CHIRPS geraram picos de vazão mais altos em comparação com os dados do CSFR (dados de precipitação da Reanálise do Sistema de Previsão Climática). Na fase de validação, ambos os modelos tiveram uma queda no desempenho, mas o SWAT+ Toolbox ainda apresentou valores de NSE e KGE superiores ao R-SWAT, indicando maior capacidade de generalização. Nogueira, Silva e Minoti (2024), tiveram dificuldades na calibração e verificação do modelo utilizando o SWAT+ para simular a vazão na bacia do córrego Capão Comprido, no Distrito Federal. Os autores obtiveram valores de NSE e  $\log(\text{NSE})$  abaixo de 0,5, percent bias (PBIAS) acima de  $\pm 15$  e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) abaixo de 0,6, considerados insatisfatórios. Os autores atribuem essa limitação do SWAT+ à representação simplificada do fluxo de água subterrânea, pois o modelo considera cada aquífero como um sistema homogêneo, com propriedades como condutividade hidráulica sendo constantes em toda a sua extensão.

A análise de incerteza calculada através do algoritmo SUFI-2 no R-SWAT forneceu um *p-fator*  $< 0,001$  para calibração e de *p-fator* de 0,01 para validação e um *r-fator* de 0,01 para calibração e 0,02 para validação. O valor de *p-fator* igual a 0 na calibração indica que nenhuma das simulações realizadas durante a fase de calibração ocorreu dentro da banda de incerteza dos dados observados. Esse resultado sugere que o modelo não está conseguindo reproduzir os dados observados de forma satisfatória. Para a validação o valor de *p-fator* igual a 0,01 indica que apenas 1% das simulações da fase de validação ocorreram dentro da banda de incerteza.

Isso confirma a dificuldade do modelo em generalizar o resultado para dados independentes.

A baixa densidade das simulações dentro da banda de incerteza na validação sugere que o modelo não é capaz de prever com precisão eventos futuros. Este resultado pode estar atrelado aos parâmetros do modelo que não estão bem ajustados e, portanto, não conseguem representar os processos hidrológicos (Harifidy et al., 2024). Erros nos dados de entrada (principalmente dados de solo), pode ter comprometido a qualidade das simulações (Worqlul et al., 2017); a estrutura do modelo SWAT+ pode não ser adequada para representar a complexidade de bacias pequenas e com dados limitados (Tapas et al., [s. d.]); os algoritmos DDS e SUFI-2 podem não ser os mais recomendados para o conjunto de dados, além a estrutura do modelo SWAT+ (N'guessan et al., 2023; Nguyen et al., 2022; Nogueira; Silva; Minoti, 2024) .

Um *r-fator* de 0,01 durante a calibração sugere que a largura do intervalo de incerteza é estreita em relação a amplitude dos dados observados. Isso pode indicar que o modelo foi ajustado com um intervalo de incerteza muito pequeno, possivelmente subestimando a incerteza (Abbaspour, 2015). Para a validação o *r-fator* de 0,02 também é considerado estreito. Um *r-fator* tão baixo pode indicar que o intervalo de incerteza está sendo subestimado, ou seja, o modelo pode estar produzindo intervalos de previsão excessivamente estreitos, o que não é realista, especialmente em um contexto hidrológico com grande variabilidade (Abbaspour, 2015).

O software SWAT+ Toolbox realiza a análise de sensibilidade apenas de forma visual, não fornecendo os valores do *p-fator* e *r-fator*, não sendo possível a comparação com o R-SWAT.

### 5.3.2.2 Vazão diária

Os resultados dos indicadores estatísticos para a calibração da vazão diária para o R-SWAT apresentaram um NSE de 0,68, sendo considerado como satisfatório e um KGE de 0,66 (Bom). Na validação o R-SWAT apresentou um NSE igual a 0,62 e KGE igual a 0,51, valores considerados aceitáveis (Moriasi et al., 2007). Estes valores indicam um desempenho moderado do modelo, assim como ocorreu com a

calibração mensal com o NSE apontando para uma capacidade razoável do modelo reproduzir as condições observadas de vazão, e o KGE refletindo uma boa correlação entre as vazões simuladas e observadas. Observa-se que no R-SWAT os indicadores estatísticos foram melhores na calibração diária do que mensal. Por outro lado, o SWAT+ Toolbox, obteve resultados superiores na calibração mensal, apresentando para a vazão diária um NSE de 0,67 (Satisfatório) e um KGE de 0,52 (satisfatório). No entanto, na validação, o KGE alcançou 0,78, classificando-se como Muito Bom (KGE > 0,75) e um NSE 0,74 considerado Bom (Moriassi et al., 2007; Thiemiig et al., 2013).

Os resultados indicam que na calibração diária, tanto o R-SWAT quanto o SWAT+ Toolbox apresentaram desempenhos semelhantes em termos de NSE, com ambos os valores sendo classificados como "Satisfatórios". Entretanto, o desempenho do SWAT+ Toolbox, quando avaliado pelo KGE, foi ligeiramente inferior na calibração, ainda que dentro da mesma categoria considerada "Bom".

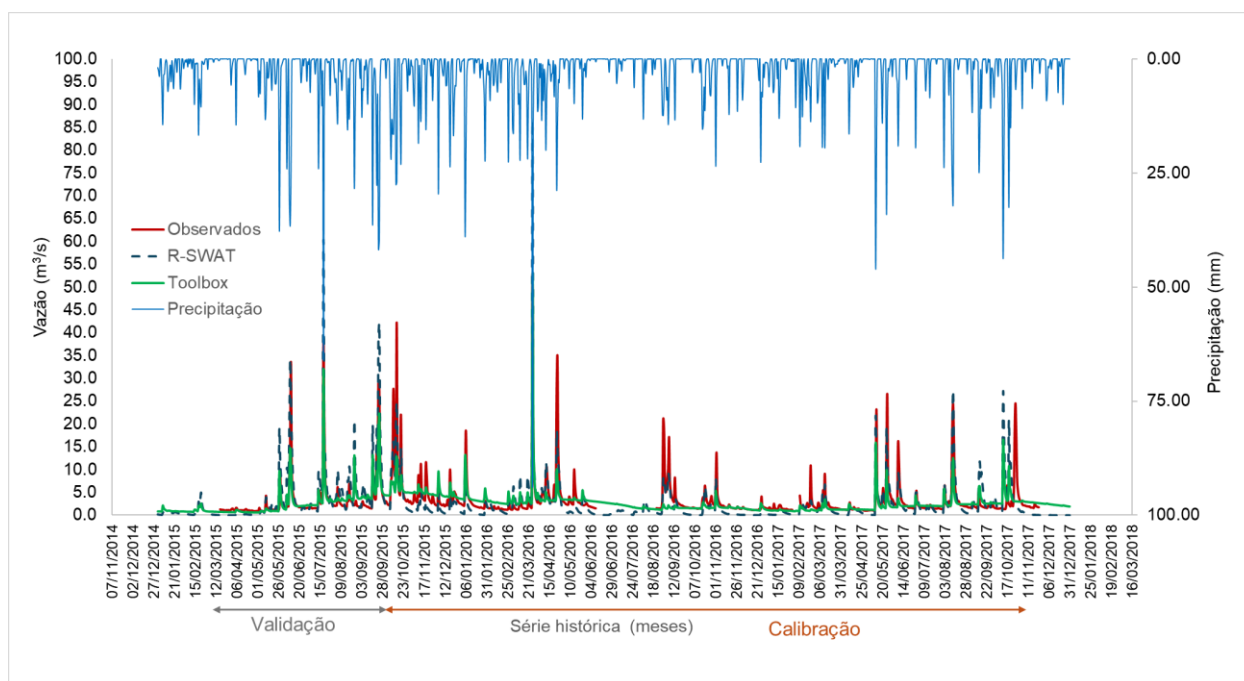
A validação diária com o SWAT+ Toolbox, demonstrou uma melhoria significativa, especialmente no KGE, que foi classificado como "Muito Bom". O NSE também foi superior no SWAT+ Toolbox em comparação ao R-SWAT, que se manteve na categoria "Satisfatório". Esses resultados sugerem que o algoritmo DDS, utilizado pelo SWAT+ Toolbox, conseguiu ajustar melhor os parâmetros do modelo durante a calibração, resultando em uma performance mais robusta na validação.

A análise dos indicadores estatísticos de desempenho, quando consideramos os algoritmos de calibração empregados (SUFI-2 e DDS) influenciam no desempenho do modelo tanto na calibração como validação. No contexto do R-SWAT, o uso do SUFI-2 facilitou a identificação de combinações de parâmetros que fornecem um desempenho satisfatório, como evidenciado pelos valores de NSE e KGE obtidos durante a calibração e validação diária. Porém, no SWAT+ Toolbox, a aplicação do DDS resultou em uma calibração mais refinada, especialmente evidente nos elevados valores de KGE durante a validação diária, indicando uma melhor representação da vazão.

Enquanto o SUFI-2 proporciona uma cobertura uniforme e abrangente do espaço de parâmetros (Bayat; Alizadeh; Mojaradi, 2023), o DDS oferece uma abordagem mais focada e eficiente para a otimização de parâmetros em cenários complexos e de alta dimensionalidade, como é o caso do SWAT+ (Tolson;

Shoemaker, 2007). As vazões diárias simuladas pelos dois softwares estão apresentadas na Figura 20.

Figura 20 - Precipitação diária e vazão diária simulada pelos softwares R-SWAT e SWAT+ Toolbox e vazão observada para a bacia do arroio Cadeia.



Através da análise visual do hidrograma (Figura 20) é possível identificar os picos de vazão, que são representados por aumentos rápidos e pronunciados nas curvas do hidrograma. Essa vazão de pico é importante para avaliar a capacidade do modelo em simular eventos de precipitação intensa e suas respostas hidrológicas subsequentes (Mohammadi; Vazifekhah; Duan, 2024). Na Figura 20, observa-se que a linha pontilhada azul do R-SWAT, em muitos casos, apresenta uma resposta mais exagerada aos eventos de precipitação em comparação com os dados observados, frequentemente superestimando os picos de vazão. Isso pode indicar uma sensibilidade excessiva do modelo calibrado com o algoritmo SUFI-2 a eventos de precipitação, ou uma inadequação nos parâmetros que controlam a infiltração e o escoamento superficial.

Por outro lado, a linha contínua verde do SWAT+ Toolbox, utilizando o algoritmo DDS, demonstra maior proximidade aos picos observados, embora ainda ocorram algumas discrepâncias. A simulação com o SWAT+ Toolbox parece responder de

maneira mais equilibrada, não superestimando os picos de maneira tão frequente quanto o R-SWAT.

A vazão do fluxo de base, ou seja, a vazão mínima que ocorre ao longo do tempo entre os eventos de precipitação, é um indicador da capacidade do modelo em representar o comportamento do fluxo de base na bacia hidrográfica, que é influenciado por fatores como a recarga de aquíferos e a evapotranspiração (Brighenti; Bonumá; Chaffe, 2016). Na análise do fluxo de base, observa-se que o modelo calibrado com o SWAT+ Toolbox (linha verde) segue mais de perto o comportamento dos dados observados (linha vermelha), especialmente em períodos secos, mantendo uma consistência maior com as vazões mínimas observadas. Em contrapartida, o R-SWAT mostra flutuações mais significativas, tanto com subestimações quanto superestimações do fluxo de base, o que pode indicar uma calibração menos refinada para as condições de fluxo base, resultando em uma menor precisão na simulação.

A análise de incerteza calculada através do algoritmo SUFI-2 no R-SWAT para a vazão diária forneceu um *p-fator* igual a 0,04 para calibração e de 0,1 para validação. O *p-fator* de 0,04 indica que apenas 4% dos dados observados estão dentro do intervalo de incerteza (2,5% a 97,5%) durante a calibração. Este valor é relativamente baixo, sugerindo que o modelo não está capturando adequadamente a variabilidade dos dados observados durante a fase de calibração (Abbaspour, 2015). Para a validação, o valor de 0,1 indica que apenas 10% das simulações na fase de validação ocorreram dentro da banda de incerteza, inferindo uma certa limitação do modelo em representar a incerteza dos dados observados.

Um *r-fator* de 0,07 durante a calibração sugere que a largura do intervalo de incerteza é relativamente pequena em comparação ao desvio padrão dos dados observados. Isso pode indicar que o modelo foi ajustado com um intervalo de incerteza estreito, possivelmente subestimando a incerteza (Abbaspour, 2015). Para a validação o *r-fator* de 0,1 é um pouco maior, indicando um intervalo de incerteza levemente mais amplo. No entanto, esse valor ainda é baixo, sugerindo que o intervalo de incerteza é estreito em relação à variabilidade dos dados observados. Portanto, os resultados indicam que tanto na fase de calibração quanto na fase de validação, o modelo SWAT+ apresentou valores baixos para o *p-fator* e *r-fator*. Isso sugere que é necessária uma revisão ou nova abordagem para a análise de sensibilidade e calibração, assim como para as análises de incertezas para que o modelo possa ser

utilizado para previsões futuras. Em termos práticos, para a gestão de recursos hídricos, um intervalo de incerteza estreito pode levar a uma subestimação dos riscos, como a ocorrência de eventos extremos (enchentes ou secas), pois não foram adequadamente capturados pelo modelo (Brighenti et al., 2019).

Os resultados encontrados neste estudo vão de encontro aos resultados encontrados por Harifidy et al, (2024). Os autores, ao comparar os modelos SWAT e SWAT+ utilizando os softwares R-SWAT e SWAT+ Toolbox para uma área de 10.000 km<sup>2</sup> em Madagascar, identificaram que o SWAT+ não se mostrou adequado para modelar a área de estudo e que o R-SWAT e o SWAT+ Toolbox não foram eficazes na calibração do modelo SWAT+. Os estudos de Nogueira, Silva e Minoti (2024), também verificaram que o SWAT+ Toolbox não foi adequada para calibração e validação do modelo na bacia do Córrego Capão Comprido, pois diversos parâmetros que controlam o módulo de águas subterrâneas no SWAT+ ainda não foi incluído no software. Conforme verificado neste estudo, o módulo de águas subterrâneas é relevante para a BHAC, portanto, os parâmetros faltantes no software tais como: profundidade inicial da água no aquífero raso (mm H<sub>2</sub>O) (SHALLST), atraso da água subterrânea (dias) (GW\_DELAY), profundidade inicial da água no aquífero profundo (mm H<sub>2</sub>O) (DEEPST), altura inicial da água subterrânea (m) (GWHT) e fração de percolação do aquífero profundo (RCHRG\_DP), poderão ser relevantes para a dinâmica da água na BHAC.

Pode-se verificar que os parâmetros relacionados direta ou indiretamente ao tipo de solo (condutividade hidráulica do solo saturado, densidade aparente, capacidade de armazenamento de água no solo, por exemplo), se mostraram sensíveis ao modelo em ambos os softwares, portanto, os resultados sugerem que a incerteza nos dados do solo pode estar prejudicando as estimativas da vazão mensal e diária. Este resultado corrobora com os resultados encontrados por Worqlul et al. (2017), que ao estudarem os efeitos das características do solo no escoamento e no balanço hídrico em duas bacias hidrográficas de características diferentes no Nilo, recomendaram o desenvolvimento de um banco de dados de solos de alta resolução.

Avaliando outros aspectos dos softwares, o SWAT+ Toolbox é mais fácil de manusear, pois é mais intuitivo e está integrado ao executável do SWAT+, porém, é uma caixa preta. Nele não é possível alterar nenhuma métrica ou algoritmo, além do que as análises de sensibilidade não são detalhadas (Harifidy et al., 2024). Não é

apresentado o *p-valor*, apenas o *t-Stat* na análise de sensibilidade com o SWAT+ Toolbox. Também não há um manual informando como e quais algoritmos são utilizados para as análises de incerteza, assim como não é informado os valores do *r-fator* e *p-fator*, apenas uma visualização gráfica. Entretanto o R-SWAT apresenta um manual explicativo que permite ao usuário compreender como e quais algoritmos ele adota para cada etapa. A análise de sensibilidade no R-SWAT apresenta informações detalhadas do *t-Stat* e *p-valor*, assim como gráficos para cada variável. Para a análise de incertezas o R-SWAT permite a extração de uma planilha eletrônica contendo as informações detalhadas sobre os quartis, *p-fator*, *r-fator* e ilustrações.

Com relação ao tempo de processamento, verificou-se que o R-SWAT foi mais rápido que o SWAT+ Toolbox, isso porque o R-SWAT reescreve um único arquivo com todos os valores de parâmetros atualizados ao final do processamento (Nguyen et al., 2022). Desta forma, a ferramenta R-SWAT apresenta benefícios quando comparada ao SWAT+ Toolbox, embora este tenha apresentado melhor desempenho que o R-SWAT neste estudo.

#### **5.4 Conclusão**

A análise dos resultados indicou a necessidade de combinar diferentes métricas estatísticas e ferramentas gráficas para minimizar a subjetividade inerente ao uso de uma única abordagem de avaliação. Quando analisado isoladamente, o KGE apresentou resultados satisfatórios como métrica de desempenho. No entanto, ao ser complementado pela análise do NSE, observou-se um decréscimo nos valores, tanto na fase de calibração quanto na de validação. Apesar disso, os resultados ainda foram considerados adequados para o contexto da pesquisa. O emprego de diferentes indicadores estatísticos para a calibração do modelo SWAT+ pode retratar de forma mais adequada o ajuste desejado, minimizando resultados tendenciosos. A análise dos hidrogramas de vazão revelou que, embora ambos os softwares tenham demonstrado limitações na representação do fluxo de base, o SWAT+ Toolbox conseguiu um ajuste mais preciso para as vazões mensais e diárias, indicando um desempenho superior nesse aspecto específico.

A inclusão da análise de incertezas permitiu concluir que o ajuste do modelo SWAT+ foi insuficiente para representar adequadamente as vazões mensais e diárias,

independentemente do software ou algoritmo utilizado. Este resultado enfatiza uma das principais limitações na calibração de modelos hidrológicos: o desempenho final não está condicionado apenas à escolha do método de calibração. A qualidade e a quantidade dos dados de vazão observada, as incertezas nos dados de entrada, como a caracterização do tipo de solo para obtenção de dados de campo, a seleção de parâmetros sensíveis e a definição da função objetivo são fatores que influenciam diretamente a precisão e a confiabilidade dos resultados do modelo.

Dado que a análise foi conduzida em uma bacia hidrográfica de pequena escala, com uma série temporal limitada de dados de vazão observados e sem levantamento de campo para a caracterização dos solos para entrada no modelo, é recomendável que futuros estudos na bacia hidrográfica do arroio Cadeia (BHAC) sejam realizados com foco na revisão das abordagens de sensibilidade e calibração. Particularmente, é importante explorar o uso de algoritmos disponíveis no pacote R-SWAT, que, embora não sejam facilmente acessíveis na interface padrão, podem ser ajustados via modificação do código-fonte. A coleta de dados de campo para uma caracterização mais precisa dos atributos do solo em cada tipo de solo, pode reduzir as incertezas nos dados de entrada e, conseqüentemente, melhorar o desempenho do modelo SWAT+. Essas ações são fundamentais para aumentar a robustez das simulações e fornecer subsídios mais confiáveis para a gestão hídrica em bacias hidrográficas similares a BHAC. Como sugestão para estudos futuros, recomenda-se ainda realizar a comparação do modelo SWAT+ com sua versão anterior.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados apresentados no Capítulo 1 deste estudo fornecem uma visão abrangente sobre a evolução dos estudos relacionados aos softwares e algoritmos aplicados ao modelo SWAT+, especificamente na análise de sensibilidade, calibração, validação e incertezas. A partir de uma avaliação cienciométrica e revisão sistemática, foi possível traçar um panorama do desenvolvimento e uso dessas ferramentas ao longo dos anos, destacando tendências, autores influentes e lacunas na literatura.

A hipótese levantada, que propõe que o avanço em hardware e computação de alto desempenho tem impulsionado o uso de algoritmos mais complexos e softwares de código aberto para a calibração do modelo SWAT+, foi testada a partir dos dados coletados. Contudo, os resultados indicam que, embora tenha havido um crescimento no uso de algoritmos sofisticados e na adoção de softwares de código aberto, a aplicação dessas ferramentas ainda é restrita e concentrada em um número limitado de estudos. Por exemplo, o estudo revelou que a maior parte das pesquisas continua a utilizar o software SWAT-CUP, que tem sido predominante nas análises relacionadas ao modelo SWAT. Em contrapartida, softwares *open source* como o R-SWAT, IPEAT+, e o SWAT Toolbox permanecem subexplorados, sugerindo que o impulso previsto na hipótese ainda não se consolidou de forma abrangente na comunidade científica. Além disso, a versão mais recente do modelo, o SWAT+, apesar de suas melhorias, ainda não foi amplamente adotada, o que pode ser atribuído à falta de estudos focados em sua calibração e validação com esses novos algoritmos, além da complexidade de integração dos dados.

Outro ponto relevante foi o que a análise geográfica revelou. Há uma carência de publicações provenientes de regiões como América do Sul, África, Ásia Central e Europa Oriental. Essa lacuna pode ser atribuída a limitações de infraestrutura, financiamento e capacitação técnica, além de possíveis barreiras geopolíticas, que restringem o avanço e a difusão das novas tecnologias de modelagem hidrológica nessas áreas. Adicionalmente, a aplicação predominante do modelo SWAT/SWAT+ em grandes bacias hidrográficas, enquanto bacias menores, com até 150 km<sup>2</sup>, como a BHAC representam apenas uma pequena fração dos estudos. Este dado sugere uma lacuna significativa, onde as inovações em algoritmos e softwares poderiam ser mais exploradas para melhorar a modelagem em bacias de menor escala.

Com base nos dados apresentados, pode-se concluir que a primeira hipótese levantada inicialmente por este estudo foi parcialmente aceita. Embora existam evidências de que avanços em hardware e computação de alto desempenho tenham promovido o desenvolvimento de algoritmos mais complexos e a criação de softwares de código aberto, sua aplicação prática ainda é limitada. Há uma necessidade de maior incentivo à adoção dessas tecnologias, bem como à realização de mais estudos comparativos que explorem o potencial dos novos softwares e algoritmos, especialmente em contextos geográficos e de escala que ainda são pouco representados na literatura científica.

Durante a avaliação do desempenho do modelo SWAT+, por meio dos softwares em R-SWAT e SWAT+ Toolbox, foi observado que a utilização de uma combinação de índices estatísticos, como o KGE e o NSE, juntamente com análises gráficas, é essencial para minimizar a subjetividade comum em abordagens isoladas. No entanto, ao avaliar conjuntamente os resultados de KGE e NSE, os resultados, embora satisfatórios, apresentaram um declínio tanto na etapa de calibração quanto na de validação. Essa queda na precisão destaca a complexidade em garantir consistência nos resultados, especialmente quando diferentes softwares e algoritmos são utilizados.

Além disso, as análises dos hidrogramas de vazão revelaram que, apesar das simulações produzidas pelos dois softwares apresentarem dificuldades em capturar adequadamente as condições de fluxo de base, o SWAT+ Toolbox conseguiu alcançar ajustes satisfatórios para valores de pico e de base. Entretanto, a inclusão da análise de incertezas evidenciou que o ajuste do modelo SWAT+ foi inadequado para as vazões mensais e diárias, independentemente do software ou algoritmo utilizado.

Esses achados sugerem que, embora existam variações no desempenho entre o R-SWAT e o SWAT+ Toolbox, essas diferenças não são suficientemente pronunciadas para afirmar que um software é significativamente mais eficiente ou preciso que o outro nas condições específicas deste estudo. As limitações identificadas, como a pequena série de dados observados de vazão e a ausência de dados de solo obtidos em campo, destacam que a precisão dos resultados está fortemente vinculada à qualidade dos dados de entrada e à escolha de parâmetros sensíveis, e não exclusivamente ao software ou algoritmo utilizado.

Dessa forma, a hipótese de que há uma diferença significativa na eficiência e precisão dos resultados entre os dois softwares foi parcialmente refutada. As diferenças observadas foram identificadas, mas não substanciais o suficiente para uma conclusão definitiva, especialmente quando se considera a influência de outros fatores, como a incerteza nos dados de entrada e as particularidades da bacia hidrográfica estudada. Portanto, recomenda-se a realização de estudos futuros com dados mais robustos e uma avaliação ampliada das variáveis e faixas de valores envolvidos, para se explorar com mais profundidade a eficácia comparativa desses softwares em diferentes contextos e escalas.

## REFERÊNCIAS

- AAWAR, T.; KHARE, D. Assessment of climate change impacts on streamflow through hydrological model using SWAT model: a case study of Afghanistan. **Modeling Earth Systems and Environment**, [s. l.], v. 6, n. 3, p. 1427–1437, 2020.
- ABBAS, S. A. *et al.* A framework for parameter estimation, sensitivity analysis, and uncertainty analysis for holistic hydrologic modeling using SWAT+. **Hydrology and Earth System Sciences**, [s. l.], v. 28, n. 1, p. 21–48, 2024.
- ABBASPOUR, K. C. *et al.* A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 524, p. 733–752, 2015.
- ABBASPOUR, K. C. *et al.* Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 333, n. 2–4, p. 413–430, 2007.
- ABBASPOUR, K. C. **SWAT-CUP 2012: SWAT calibration and uncertainty programs - A user manual**. [S. l.]: Eawag Aquatic Research, 2015. ISSN 14343916.
- ABBASPOUR, K. C.; JOHNSON, C. A.; VAN GENUCHTEN, M. Th. Estimating Uncertain Flow and Transport Parameters Using a Sequential Uncertainty Fitting Procedure. **Vadose Zone Journal**, [s. l.], v. 3, n. 4, p. 1340–1352, 2004.
- ABDULLAH, K. H. An Analysis of Publications on Climate Change Communication Using a Bibliometric Lens. **Fronteiras**, [s. l.], v. 12, n. 3, p. 354–371, 2023.
- ACHARKI, S. *et al.* Hydrological modeling of spatial and temporal variations in streamflow due to multiple climate change scenarios in northwestern Morocco. **Climate Services**, [s. l.], v. 30, n. May, p. 100 - 388, 2023.
- ADDOR, N.; MELSEN, L. A. Legacy, Rather Than Adequacy, Drives the Selection of Hydrological Models. **Water Resources Research**, [s. l.], v. 55, n. 1, p. 378–390, 2019.
- ADLM, AGÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DA LAGOA MIRIM. **Bacia Hidrográfica Mirim – São Gonçalo (BHMSG)**. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://agencialagoamirim.com.br/bacia-hidrografica/>. Acesso em: 20 nov. 2022.
- ADMAS, B. F. *et al.* Identification of soil erosion hot-spot areas for prioritization of conservation measures using the SWAT model in Ribb watershed, Ethiopia. **Resources, Environment and Sustainability**, [s. l.], v. 8, n. March, p. 100059, 2022.
- AFLAH, W. N. Modeling the Impacts of Conservation Agriculture on Hydrological Processes and Crop Yield Using the Swat Model a Study Case in the Hupsel Catchment, **East Netherlands**. 2022. - University of Twente, [s. l.], 2022.

AKOKO, G. *et al.* A review of swat model application in Africa. **Water (Switzerland)**, [s. l.], v. 13, n. 9, 2021.

ALAWI, S. A.; ÖZKUL, S. Evaluation of land use/land cover datasets in hydrological modelling using the SWAT model. **H2Open Journal**, [s. l.], v. 6, n. 1, p. 63–74, 2023.

ALEMAYEHU, A. A. *et al.* Estimation of sediment yield and effectiveness of level stone bunds to reduce sediment loss in the Gumara-Maksegnit watershed, Nile Basin, Ethiopia. **Journal of Soils and Sediments**, [s. l.], v. 20, n. 10, p. 3756–3768, 2020.

ALEMU, G. T. *et al.* Evaluation of semi-distributed hydrological models performance in Borkena watershed; upper awash basin, Ethiopia. **Heliyon**, [s. l.], v. 9, n. 7, p. e18030, 2023.

ALI, M. H. *et al.* Remote Sensed and/or Global Datasets for Distributed Hydrological Modelling: A Review. **Remote Sensing**, [s. l.], v. 15, n. 6, p. 1–43, 2023.

ALIPOUR, M.; HOSSEINI, M. Simulation of surface runoff in Karaj dam basin, Iran. **Applied Water Science**, [s. l.], v. 8, n. 5, 2018.

ALIYARI, F.; BAILEY, R. T.; ARABI, M. Appraising climate change impacts on future water resources and agricultural productivity in agro-urban river basins. **Science of the Total Environment**, [s. l.], v. 788, p. 147717, 2021.

ALOUI, S. *et al.* A review of *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) studies of Mediterranean catchments: Applications, feasibility, and future directions. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 326, n. PB, p. 116799, 2023.

ALP, H.; DEMIREL, M. C.; AŞIKOĞLU, Ö. L. Effect of Model Structure and Calibration Algorithm on Discharge Simulation in the Acisu Basin, Turkey. **Climate 2022, Vol. 10, Page 196**, [s. l.], v. 10, n. 12, p. 196, 2022.

ANA, Agência Nacional de Águas E Saneamento. **Portal HidroWeb**. [S. l.], 2020. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>. Acesso em: 20 out. 2020.

ANDRADE, C. W. L. de *et al.* Sensitivity analysis of SWAT model parameters applied in a sub-basin of Northeast Region, Brazil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [s. l.], v. 10, n. 2, 2017.

AQUINO, L. S. **Modelagem hidrológica na região Sul do Rio Grande Sul utilizando os modelos SWAT e LASH**. 2014. 96 f. - Universidade Federal de Pelotas, [s. l.], 2014.

ARIA, M.; CUCCURULLO, C. bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. **Journal of Informetrics**, [s. l.], v. 11, n. 4, p. 959–975, 2017.

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 (Switzerland)**, [s. l.], v. 15, n. 14, p. 1–18, 2023.

ARNOLD, J. G. *et al.* Automated Base Flow Separation and Recession Analysis Techniques. **Ground Water**, [s. l.], v. 33, n. 6, p. 1010–1018, 1995.

ARNOLD, J. G. *et al.* Large Area Hydrologic Modeling And Assessment Part I : Model Development ' Basin Scale Model Called SWAT (Soil and Water speed and storage , advanced software debugging policy to meet the needs , and the management to the tank model. Sugawara *et al.*, 1. [s. l.], v. 34, n. 1, p. 73–89, 1998.

ARNOLD, J.G *et al.* SWAT: Model use, calibration and validation. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, [s. l.], v. 55, n. 4, p. 1491–1508, 2012.

ASGARI, M. *et al.* A review of parallel computing applications in calibrating watershed hydrologic models. **Environmental Modelling and Software**, [s. l.], v. 151, n. February, p. 105370, 2022.

ATHIRA, P. *et al.* Predictions in ungauged basins: an approach for regionalization of hydrological models considering the probability distribution of model parameters. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, [s. l.], v. 30, n. 4, p. 1131 – 1149, 2016.

ATHIRA, P.; NANDA, C.; SUDHEER, K. P. A computationally efficient method for uncertainty analysis of SWAT model simulations. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, [s. l.], v. 32, n. 6, p. 1479–1492, 2018.

ÁVILA, L. *et al.* Comparative Evaluation of Five Hydrological Models in a Large-Scale and Tropical River Basin. **Water (Switzerland)**, [s. l.], v. 14, n. 19, p. 1–21, 2022.

AYELE, G. T. *et al.* Streamflow and sediment yield prediction for watershed prioritization in the upper Blue Nile river basin, Ethiopia. **Water (Switzerland)**, [s. l.], v. 9, n. 10, 2017.

BALAJI, N.; DHANESH, Y. **Excel template calculates SWAT soil parameters using the Pedo Transfer Function (PTF)**. [S.l]: [s. n.], 2011. Disponível em: [https://github.com/SWAT-Brasil/util/tree/master/prepara\\_parametros\\_solos](https://github.com/SWAT-Brasil/util/tree/master/prepara_parametros_solos).

BANINAJAR, H.; SARANG, A.; KARBASSI, A. Multi-criteria calibration and uncertainty analysis of SWAT model: integrating in-situ discharge and remotely sensed ET in the Ilam dam basin, and direct calibration in ungauged basins. **Preprint**, [s. l.], p. 0–54, 2023.

BAYAT, M.; ALIZADEH, H.; MOJARADI, B. Assimilation versus optimization for SWAT calibration: accuracy, uncertainty, and computational burden analysis. **Water Supply**, [s. l.], v. 23, n. 3, p. 1189–1207, 2023.

BEKELE, E. G.; NICKLOW, J. W. Multi-objective automatic calibration of SWAT using NSGA-II. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 341, n. 3–4, p. 165–176, 2007.

BENNOUR, A. *et al.* Calibration and Validation of SWAT Model by Using Hydrological Remote Sensing Observables in the Lake Chad Basin. **Remote Sensing**, [s. l.], v. 14, n. 6, 2022.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do Solo**. 9. ed. São Paulo: Editora Ícone, 2012.

BIEGER, K. *et al.* Introduction to SWAT+, A Completely Restructured Version of the *Soil and Water Assessment Tool*. **Journal of the American Water Resources Association**, [s. l.], v. 53, n. 1, p. 115–130, 2017.

BRANDÃO, V. S. *et al.* **Infiltração da água no solo**. Viçosa: UFV, 2006.

BRESSIANI, D. de A. *et al.* A review of *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) applications in Brazil: Challenges and prospects. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, [s. l.], v. 8, n. 3, p. 1–27, 2015.

BRESSIANI, D. D. A. **Coping with hydrological risks through flooding risk index, complex watershed modeling, different calibration techniques, and ensemble streamflow forecasting**. 2016. 224 f. - Universidade de São Paulo, [s. l.], 2016.

BRIGHENTI, T. M. *et al.* Simulating sub-daily hydrological process with SWAT: a review. **Hydrological Sciences Journal**, [s. l.], v. 64, n. 12, p. 1415–1423, 2019a.

BRIGHENTI, T. M.; BONUMÁ, N. B.; CHAFFE, P. L. B. Calibração hierárquica do modelo SWAT em uma bacia hidrográfica catarinense. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [s. l.], v. 21, n. 1, p. 53–64, 2016.

BROCCA, L. *et al.* A Digital Twin of the terrestrial water cycle: a glimpse into the future through high-resolution Earth observations. **Frontiers in Science**, [s. l.], v. 1, n. March, p. 1–18, 2024.

CAI, Y. *et al.* Enhancing SWAT model with modified method to improve Eco-hydrological simulation in arid region. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 403, n. February, p. 136891, 2023.

CALLON, M.; COURTIAL, J. P.; LAVILLE, F. Co-word analysis as a tool for describing the network of interactions between basic and technological research: The case of polymer chemistry. **Scientometrics**, [s. l.], v. 22, n. 1, p. 155–205, 1991.

CHADLI, K. Estimation of soil loss using RUSLE model for Sebou watershed (Morocco). **Modeling Earth Systems and Environment**, [s. l.], v. 2, n. 2, p. 1–10, 2016.

CHAWANDA, C. J. **SWAT+ Toolbox**. [S. l.: s. n.], 2021.

CHOUKRI, F. *et al.* Analyse du fonctionnement hydro-sédimentaire d'un bassin versant du Rif Occidental du Maroc à l'aide du modèle SWAT: Cas du bassin versant Tleta. **Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires**, [s. l.], v. 7, n. 2, p. 304–312, 2019.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de sistemas ambientais**. 1<sup>a</sup>ed. São Paulo: Blucher, 1999.

CIBIN, R. *et al.* Application of distributed hydrological models for predictions in ungauged basins: A method to quantify predictive uncertainty. **Hydrological Processes**, [s. l.], v. 28, n. 4, p. 2033 – 2045, 2014.

CIBIN, R.; SUDHEER, K. P.; CHAUBEY, I. Sensitivity and identifiability of stream flow generation parameters of the SWAT model. **Hydrological Processes**, [s. l.], v. 24, n. 9, p. 1133–1148, 2010.

COBO, M. J. *et al.* An approach for detecting, quantifying, and visualizing the evolution of a research field: A practical application to the Fuzzy Sets Theory field. **Journal of Informetrics**, [s. l.], v. 5, n. 1, p. 146–166, 2011.

CUCELOGLU, G.; ABBASPOUR, K. C.; OZTURK, I. Assessing the water-resources potential of Istanbul by using a *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) hydrological model. **Water (Switzerland)**, [s. l.], v. 9, n. 10, 2017.

CUNHA, N. G. da; SILVEIRA, R. J. da C.; SEVERO, C. R. S. **Solos e terras do planalto sul-rio-grandense e planícies costeiras**. Pelotas: [s. n.], 2006.

DA CUNHA, Z. A. *et al.* Aplicabilidade do método número da curva (CN / SCS) com base em valores de CN tabelados: Estudo de caso na bacia hidrográfica do arroio Cadeia. **XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, [s. l.], n. May, 2019.

DAGGUPATI, P. *et al.* A recommended calibration and validation strategy for hydrologic and water quality models. **Transactions of the ASABE**, [s. l.], v. 58, n. 6, p. 1705 – 1719, 2015.

DAS, S. K. *et al.* Calibration, validation and uncertainty analysis of a SWAT water quality model. **Applied Water Science**, [s. l.], v. 14, n. 4, p. 1–15, 2024.

DECHMI, F.; SKHIRI, A.; ISIDORO, D. Modeling environmental impact in a semi-arid intensive irrigated watershed. **Agricultural Water Management**, [s. l.], v. 256, p. 107115, 2021.

DEVIA, G. K.; GANASRI, B. P.; DWARAKISH, G. S. A Review on Hydrological Models. **Aquatic Procedia**, [s. l.], v. 4, n. 1cwrcoe, p. 1001–1007, 2015.

DEVKOTA, N.; LAMICHHANE, S.; BHATTARAI, P. K. Multi-site calibration of the SWAT hydrological model and study of spatio-temporal variation of water balance components in the Narayani River Basin, central part of Nepal. **H2Open Journal**, [s. l.], v. 7, n. 1, p. 114–129, 2024.

DILE, Y. T. *et al.* Introducing a new *open-source* GIS user interface for the SWAT model. **Environmental Modelling and Software**, [s. l.], v. 85, p. 129–138, 2016.

DILE, Y.; SRINIVASAN, R.; GEORGE, C. QGIS Interface for SWAT+: QSWAT+ Version 2.3. 2022. <https://www.collegesidekick.com/study-docs/13319733>.

DUBEY, S. K. *et al.* Hydroclimatic Impact Assessment Using the SWAT Model in India—State of the Art Review. **Sustainability (Switzerland)**, [s. l.], v. 15, n. 22, 2023.

DURU, U.; ARABI, M.; WOHL, E. E. Modeling stream flow and sediment yield using the SWAT model: a case study of Ankara River basin, Turkey. **Physical Geography**, [s. l.], v. 39, n. 3, p. 264–289, 2018.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Dados meteorológicos diários da Estação Experimental da Cascata referente ao período de 01/01/1994 a 31/12/2019**. Pelotas: [s. n.], 2020.

ERCAN, M. B.; GOODALL, J. L. Design and implementation of a general software library for using NSGA-II with SWAT for multi-objective model calibration. **Environmental Modelling and Software**, [s. l.], v. 84, p. 112–120, 2016.

FADHILAH, N.; KUSRATMOKO, E.; KUSWANTORO. The Impact of Land Use on Hydrological Characteristics and Erosion Rate of Cilutung Watershed with SWAT Model. **E3S Web of Conferences**, [s. l.], v. 73, 2018.

FENG, X. *et al.* Modeling soil erosion and its response to land-use change in hilly catchments of the Chinese Loess Plateau. **Geomorphology**, [s. l.], v. 118, n. 3–4, p. 239–248, 2010.

FRANCESCONI, W. *et al.* Using the *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) to model ecosystem services: A systematic review. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 535, p. 625–636, 2016.

FRANCO, A. C. L.; BONUMÁ, N. B. Calibração multi-variável do modelo SWAT com evapotranspiração proveniente de sensoriamento remoto e vazão observada. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [s. l.], v. 22, 2017.

GAO, J. *et al.* Potentially long-lasting effects of the pandemic on scientists. **Nature Communications**, [s. l.], v. 12, n. 1, p. 6–11, 2021.

GASSMAN, P. *w et al.* The *Soil and Water Assessment Tool*: Historical Development, Applications, and Future Research Directions. **Transactions of the ASABE**, [s. l.], v. 50, n. 4, p. 1211–1250, 2007.

GETACHEW, B.; MANJUNATHA, B. R. Impacts of Land-Use Change on the Hydrology of Lake Tana Basin, Upper Blue Nile River Basin, Ethiopia. **Global Challenges**, [s. l.], v. 2200041, p. 1–13, 2022.

GILLER, K. E. *et al.* The future of farming: Who will produce our food?. **Food Security**, [s. l.], v. 13, n. 5, p. 1073–1099, 2021.

GUPTA, H. V. *et al.* Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 377, n. 1–2, p. 80–91, 2009.

HANCHANE, M. *et al.* Performance Evaluation of Terra Climate Monthly Rainfall Data after Bias Correction in the Fes-Meknes Region (Morocco). **Climate**, [s. l.], v. 11, n. 6, 2023.

HARIFIDY, R. Z. *et al.* Multi-gauge calibration comparison for simulating streamflow across the Major River Basins in Madagascar: SWAT p Toolbox, R-SWAT, and SWAT p Editor Hard calibration. **Hydrology Research**, [s. l.], v. 55, n. 3, p. 412–430, 2024.

HEIDELMAN, M.; VURAL, D. C. Geomorphodynamics, evolution, and ecology of vertical roots. **Frontiers in Plant Science**, [s. l.], v. 14, n. April, p. 1–11, 2023.

HER, Y.; CHAUBEY, I. Impact of the numbers of observations and calibration parameters on equifinality, model performance, and output and parameter uncertainty. **Hydrological Processes**, [s. l.], v. 29, n. 19, p. 4220–4237, 2015.

HERMAN, M. R. *et al.* Evaluating the role of evapotranspiration remote sensing data in improving hydrological modeling predictability. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 556, p. 39–49, 2018.

HERNANDEZ-SUAREZ, J. S. *et al.* Evaluation of the impacts of hydrologic model calibration methods on predictability of ecologically relevant hydrologic indices. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 564, n. 517, p. 758–772, 2018.

HERRERA, P. A.; MARAZUELA, M. A.; HOFMANN, T. Parameter estimation and uncertainty analysis in hydrological modeling. **WIREs Water**, [s. l.], v. 9, n. 1, p. 1–23, 2022.

HIRSCH, J. E. Does the h index have predictive power? **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, [s. l.], v. 104, n. 49, p. 19193–19198, 2007.

HNATIV, R.; YAKHNO, O.; HNATIV, I. Formation of the Surface Runoff of the Rivers of the Carpathian Region during the Urbanization of Slope Areas. **Journal of Ecological Engineering**, [s. l.], v. 24, n. 5, p. 249–255, 2023.

HOLLAWAY, M. J. *et al.* The challenges of modelling phosphorus in a headwater catchment: Applying a 'limits of acceptability' uncertainty framework to a water quality model. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 558, p. 607–624, 2018.

HOSSEINI, S. H.; KHALEGHI, M. R. Application of SWAT model and SWAT-CUP software in simulation and analysis of sediment uncertainty in arid and semi-arid

watersheds (case study: the Zoshk–Abardeh watershed). **Modeling Earth Systems and Environment**, [s. l.], v. 6, n. 4, p. 2003–2013, 2020.

HOU, L.; PAN, Y.; ZHU, J. J. H. Impact of scientific, economic, geopolitical, and cultural factors on international research collaboration. **Journal of Informetrics**, [s. l.], v. 15, n. 3, p. 101194, 2021.

HUGHES, D. A.; LAWRENCE, D. Quantifying ‘realistic’ uncertainty bounds as a part of sound hydrological modelling practice in data scarce regions of southern Africa. **Environmental Modelling and Software**, [s. l.], v. 179, n. March, p. 106112, 2024.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo agropecuário 2017: características gerais das produções agropecuária e extrativista, segundo a cor ou raça do produtor e recortes territoriais específicos**. [S. l.: s. n.], 2022.

INMET, Instituto Nacional de Meteorologia. **Banco de Dados Meteorológicos**. [S. l.], 2020. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br/>. Acesso em: 20 out. 2020.

ISLAM, K. *et al.* Insights to the water balance of a Boreal watershed using a SWAT model. **Environmental Research Communications**, [s. l.], v. 6, n. 5, 2024.

JANJIĆ, J.; TADIĆ, L. Fields of Application of SWAT Hydrological Model—A Review. **Earth (Switzerland)**, [s. l.], v. 4, n. 2, p. 331–344, 2023.

JAXA, E. **ALOS Global Digital Surface Model “ALOS World 3D - 30m” (AW3D30)**. [S. l.], 2021. Disponível em: [https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/dataset/aw3d30/aw3d30\\_e.htm](https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/dataset/aw3d30/aw3d30_e.htm). Acesso em: 2 out. 2021.

JOBBÁGY, J. *et al.* Evaluation of Soil Infiltration Variability in Compacted and Uncompacted Soil Using Two Devices. **Water (Switzerland)**, [s. l.], v. 15, n. 10, 2023.

KAKARNDEE, I.; KOSITSAKULCHAI, E. Comparison between SWAT and SWAT+ for simulating streamflow in a paddy-field-dominated basin, northeast Thailand. **E3S Web of Conferences**, [s. l.], v. 187, 2020.

KALMÁR, T. *et al.* Quantifying uncertainties related to observational datasets used as reference for regional climate model evaluation over complex topography — a case study for the wettest year 2010 in the Carpathian region. **Theoretical and Applied Climatology**, [s. l.], v. 153, n. 1–2, p. 807–828, 2023.

KATEB, Z. *et al.* Sediment transport modeling by the SWAT model using two scenarios in the watershed of Beni Haroun dam in Algeria. **Arabian Journal of Geosciences**, [s. l.], v. 13, n. 14, 2020.

KHAN, S.; KHAN, F.; GUAN, Y. Assessment of gridded precipitation products in the hydrological modeling of a flood-prone mesoscale basin. **Hydrology Research**, [s. l.], v. 53, n. 1, p. 85–106, 2022.

KHOI, D. N. *et al.* Parameter uncertainty analysis for simulating streamflow in the upper Dong Nai river basin. **Houille Blanche**, [s. l.], v. 6368, n. 1, p. 14–23, 2017.

KIKOYO, D.; OKER, T. Comparative Evaluation of the Performance of SWAT, SWAT+, and APEX Models in Simulating Edge of Field Hydrological Processes. **Open Journal of Modelling and Simulation**, [s. l.], v. 11, n. 02, p. 37–49, 2023.

KIM, K. B.; HAN, D. Exploration of sub-annual calibration schemes of hydrological models. **Hydrology Research**, [s. l.], v. 48, n. 4, p. 1014–1031, 2017.

KMOCH, A. *et al.* The Effect of Spatial Input Data Quality on the Performance of the SWAT Model. **Water 2022, Vol. 14, Page 1988**, [s. l.], v. 14, n. 13, p. 1988, 2022.

KOCH, H. *et al.* Effects of model calibration on hydrological and water resources management simulations under climate change in a semi-arid watershed. **Climatic Change**, [s. l.], v. 163, n. 3, p. 1247–1266, 2020.

KOCH, R. **The 80/20 Principle, Third Edition: The Secret to Achieving More with Less**. Trheeed. [S. l.]: Crown Currency, 2011.

KOLTSIDA, E.; KALLIORAS, A. Multi-Variable SWAT Model Calibration Using Satellite-Based Evapotranspiration Data and Streamflow. **Hydrology**, [s. l.], v. 9, n. 7, 2022.

KOO, H. *et al.* A global sensitivity analysis approach for identifying critical sources of uncertainty in non-identifiable, spatially distributed environmental models: A holistic analysis applied to SWAT for input datasets and model parameters. **Environmental Modelling and Software**, [s. l.], v. 127, 2020.

KRNÁČOVÁ, Z. *et al.* Multifunctional Use of Agricultural Land with Support for Selected Ecosystem Services in the Territory Protected Water Management Area Žitný Ostrov. **Land**, [s. l.], v. 13, n. 1, 2024.

KRYSANOVA, V.; ARNOLD, J. G. Advances in ecohydrological modelling with SWAT - A review. **Hydrological Sciences Journal**, [s. l.], v. 53, n. 5, p. 939–947, 2008.

KUMAR, A.; SINGH, A.; GAURAV, K. Assessing the synergic effect of land use and climate change on the upper Betwa River catchment in Central India under present, past, and future climate scenarios. **Environment, Development and Sustainability**, [s. l.], v. 25, n. 6, p. 5163–5184, 2023.

KUMARASAMY, K.; BELMONT, P. Calibration parameter selection and watershed hydrology model evaluation in time and frequency domains. **Water (Switzerland)**, [s. l.], v. 10, n. 6, 2018.

LACERDA, R. T. de O.; ENSSLIN, L.; ENSSLIN, S. R. Uma análise bibliométrica da literatura sobre estratégia e avaliação de desempenho. **Gestão & Produção**, [s. l.], v. 19, n. 1, p. 59–78, 2012.

LETA, O. T. *et al.* Assessment of the different sources of uncertainty in a SWAT model of the River Senne (Belgium). **ENVIRONMENTAL MODELLING & SOFTWARE**, v. 68, p. 129–146, 2015.

LI, Q. *et al.* A new parallel framework of distributed SWAT calibration. **Journal of Arid Land**, [s. l.], v. 7, n. 1, p. 122–131, 2015.

LI, C. *et al.* Influence of different rainfall patterns and soil water content on hydrological processes in small watersheds. **Frontiers in Environmental Science**, [s. l.], v. 11, n. August, p. 1–16, 2023.

LIN, K.H. **Comparative Analysis of Cases SWAT-CUP and SWATShare for calibrating SWAT models**. 2020. 80 f. - Faculty of Purdue University, [s. l.], 2020.

LIN, Q. *et al.* PASS4SWAT: Orchestration of containerized SWAT for facilitating computational reproducibility of model calibration and uncertainty analysis. **Environmental Modelling & Software**, [s. l.], v. 178, n. May, p. 106085, 2024.

LIU, S. *et al.* Uncertainty quantification of machine learning models to improve streamflow prediction under changing climate and environmental conditions. **Frontiers in Water**, [s. l.], v. 5, n. MI, 2023.

LOPES, T. R. *et al.* Estimation of sediment production and soil loss in a water supply basin for the metropolitan region of São Paulo - Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, [s. l.], v. 118, n. December 2021, 2022.

LOTKA, A. J. The frequency distribution of scientific productivity. **Journal of the Washington Academy of Sciences**, [s. l.], v. 16, n. 12, p. 317–323, 1926.

MAKUMBURA, R. K. *et al.* Comparison of Calibration Approaches of the *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) Model in a Tropical Watershed. **Hydrology**, [s. l.], v. 9, n. 10, 2022.

MALIK, M. A.; DAR, A. Q.; JAIN, M. K. Modelling streamflow using the SWAT model and multi-site calibration utilizing SUFI-2 of SWAT-CUP model for high altitude catchments, NW Himalaya's. **Modeling Earth Systems and Environment**, [s. l.], v. 8, n. 1, p. 1203–1213, 2022.

MAPA, Ministério da Agricultura e Pecuária. **Programa Nacional de Zoneamento Agrícola de Risco Climático para o Rio Grande do Sul: Portarias safra 2015/2016**. <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/riscos-seguro/programa-nacional-de-zoneamento-agricola-de-risco-climatico/portarias/safra-2015-2016/rio-grande-do-sul/pdf>, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/riscos-seguro/programa-nacional-de-zoneamento-agricola-de-risco-climatico/portarias/safra-2015-2016/rio-grande-do-sul/pdf>. Acesso em: 20 mar. 2023.

MAPBIOMAS, Mapeamento Anual do Uso e Cobertura da Terra no Brasil. **Coleção 6 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil para o ano de**

1990, 2017 e 2020. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/>. Acesso em: 12 out. 2021.

MARU, H. *et al.* Analysis of the impacts of land use land cover change on streamflow and surface water availability in Awash Basin, Ethiopia. **Geomatics, Natural Hazards and Risk**, [s. l.], v. 14, n. 1, p. 1–25, 2023.

MATHEVET, T. *et al.* Multi-objective assessment of hydrological model performances using Nash–Sutcliffe and Kling–Gupta efficiencies on a worldwide large sample of watersheds. **Comptes Rendus - Geoscience**, [s. l.], v. 355, 2023.

MAURI, E. N. E. *et al.* Hydrosedimentological modeling in a headwater basin in Southeast Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s. l.], v. 44, 2020.

MCKAY, M. D.; BECKMAN, R. J.; CONOVER, W. J. A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code. [s. l.], v. 21, n. 2, p. 239–245, 1979.

MEBARKI, H.; MAREF, N.; DRIS, M. E. Modelling the monthly hydrological balance using Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model: A case study of the Wadi Mina upstream watershed. **Sciopen**, v. c, p. 161–177, 2024.

MELSEN, L. A. *et al.* Subjective modeling decisions can significantly impact the simulation of flood and drought events. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 568, n. September 2017, p. 1093–1104, 2019.

MENGISTU, T. D. *et al.* Quantifying regional low flows under data scarce conditions. **Heliyon**, [s. l.], v. 10, n. 7, p. e28728, 2024.

MENGISTU, A. G.; VAN RENSBURG, L. D.; WOYESSA, Y. E. Techniques for calibration and validation of SWAT model in data scarce arid and semi-arid catchments in South Africa. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, [s. l.], v. 25, n. May, p. 100621, 2019.

MERINA, R. *et al.* Modelling Technique for Sediment Evaluation at Reservoir (South India). **Water Resources**, [s. l.], v. 46, n. 4, p. 553–562, 2019.

MOHAMMADI, B.; VAZIFEHKAHAH, S.; DUAN, Z. A conceptual metaheuristic-based framework for improving runoff time series simulation in glacierized catchments. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, [s. l.], v. 127, n. PA, p. 107302, 2024.

MORAVCOVA, J. *et al.* Influence of land use enclave distribution on discharge in a small catchment. **Journal of Hydrology and Hydromechanics**, [s. l.], v. 72, n. 2, p. 268–278, 2024.

MORIASI, D. N. *et al.* Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, [s. l.], v. 50, n. 3, p. 885–900, 2007.

MUSSEHL, M. *et al.* Balancing observational data and experiential knowledge in environmental flows modeling. **Environmental Modelling and Software**, [s. l.], v. 173, n. January, p. 105943, 2024.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River Flow Forecasting Through Conceptual Models - Part I - A Discussion of Principles. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 10, n. 1970, p. 282–290, 1970.

NASSIR, A.; MISHALL, A.; MOHAMMED, A. Soil Compaction Induced by Different Tillage Systems and its Impact on Growth and Yield of Maize (*Zea Mays L.*). **University of Thi-Qar Journal of agricultural research**, [s. l.], v. 13, n. 1, p. 185–200, 2024.

NEGEWO, T. F.; SARMA, A. K. Estimation of Water Yield under Baseline and Future Climate Change Scenarios in Genale Watershed, Genale Dawa River Basin, Ethiopia, Using SWAT Model. **Journal of Hydrologic Engineering**, 1801, v. 26, n. 3, 2021.

NEITSCH, S. L. *et al.* **Soil Water Assessment Tool (SWAT) versão 2009**. Texas: [s. n.], 2011. Disponível em: <https://swat.tamu.edu/media/99193/swat2009-theory-portuguese.pdf>.

N'GUESSAN, J. Y. K. *et al.* Using the SWAT+ model to assess the conditions of water inflow to a reservoir in an uncontrolled agricultural catchment. Case Study of the Nanan Reservoir in the Lake Taabo catchment (Côte d'Ivoire). **Ecohydrology and Hydrobiology**, [s. l.], 2023.

NGUYEN, T. V. *et al.* An interactive graphical interface tool for parameter calibration, sensitivity analysis, uncertainty analysis, and visualization for the *Soil and Water Assessment Tool*. **Environmental Modelling & Software**, v. 156, n. July, p. 105497, 2022.

NICOLETTI, A. L.; REFOSCO, J. C.; PINHEIRO, A. Interception and surface runoff in different regeneration stages of Atlantic Forest, southern Brazil. **Ciência Florestal**, [s. l.], v. 32, n. 4, p. 2113–2135, 2022.

NKIAKA, E.; NAWAZ, N. R.; LOVETT, J. C. Effect of single and multi-site calibration techniques on hydrological model performance, parameter estimation and predictive uncertainty: a case study in the Logone catchment, Lake Chad basin. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, [s. l.], v. 32, n. 6, p. 1665–1682, 2018.

NOGUEIRA, M. P.; SILVA, P. R. da; MINOTI, R. T. Influence of the integrity of the riparian zone on the Capão Comprido Stream Water Basin (DF) by simulating different spatial discretizations with the SWAT+ model. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, [s. l.], v. 59, n. 1, p. 1–13, 2024.

NTI, I. K. *et al.* A Comparative Empirical Analysis of 21 Machine Learning Algorithms for Real-World Applications in Diverse Domains. **Journal of Big Dats**, [s. l.], 2021.

ODINAEV, M. *et al.* Dynamic Changes of Terrestrial Water Cycle Components over Central Asia in the Last Two Decades from 2003 to 2020. **Remote Sensing**, [s. l.], v. 15, n. 13, p. 1–20, 2023.

OLIVER, C. W. *et al.* Quantifying the Contribution of On-Site Wastewater Treatment Systems to Stream Discharge Using the SWAT Model. **Journal of Environmental Quality**, [s. l.], v. 43, n. 2, p. 539–548, 2014.

OÑATE-VALDIVIESO, F.; OÑATE-PALADINES, A.; COLLAGUAZO, M. Spatiotemporal Dynamics of Soil Impermeability and Its Impact on the Hydrology of An Urban Basin. **Land**, [s. l.], v. 11, n. 2, 2022.

PAGE, M. J. *et al.* A declaração PRISMA 2020: Diretriz atualizada para relatar revisões sistemáticas. **Epidemiologia e Serviços de Saúde**, [s. l.], v. 31, n. 2, p. 1–20, 2022.

PAN, Y.; YUAN, C.; JING, S. Simulation and optimization of irrigation schedule for summer maize based on swap model in saline region. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, [s. l.], v. 13, n. 3, p. 117–122, 2020.

PAPANICOLAOU, A. N. *et al.* Flow Resistance Interactions on Hillslopes With Heterogeneous Attributes: Effects on Runoff Hydrograph Characteristics. **Water Resources Research**, [s. l.], v. 54, n. 1, p. 359–380, 2018.

PINHEIRO, N. V.; GALVÍNCIO, J. D. Hydrological modeling using SWAT in the decision-making process for the conservation of river basins. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, [s. l.], v. 13, n. 3, p. 375–388, 2023. Disponível em: [www.periodicos.ufpe.br/revistas/jhrswww.ufpe.br/jhrs](http://www.periodicos.ufpe.br/revistas/jhrswww.ufpe.br/jhrs).

PONTES, P. R. M. *et al.* MGB-IPH model for hydrological and hydraulic simulation of large floodplain river systems coupled with open source GIS. **Environmental Modelling and Software**, [s. l.], v. 94, p. 1–20, 2017.

POOL, S.; FOWLER, K.; PEEL, M. Benefit of Multivariate Model Calibration for Different Climatic Regions. **Water Resources Research**, [s. l.], v. 60, n. 4, 2024.

PRUSKI, F. F. *et al.* Precipitação média anual vazão e vazão específica média de longa. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s. l.], v. 8, p. 247–253, 2004.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2024.

RAMÍREZ, P. G.; CARLOS, L.; CEJUDO, A. Modelos de escoamento superficial na última década. Uma revisão bibliográfica. [s. l.], v. 7, p. 7726–7750, 2023.

ROSTAMIAN, R. *et al.* Application of a SWAT model for estimating runoff and sediment in two mountainous basins in central Iran. **Hydrological Sciences Journal**, [s. l.], v. 53, n. 5, p. 977–988, 2008.

ROTAVA, J.; BRESSIANI, D. A. **Scripts em Python para Processamento de Dados de Precipitação e Interpolação para o formato do Soil & Water Assessment Tool.** [S. l.], 2020.

SAHU, M. K.; SHWETHA, H. R.; DWARAKISH, G. S. State-of-the-art hydrological models and application of the HEC-HMS model: a review. **Modeling Earth Systems and Environment**, [s. l.], v. 9, n. 3, p. 3029–3051, 2023.

SALGADO, A. A. R.; MARTINS, F. P. A elite da elite: a aplicação do Princípio de Pareto na análise da produção brasileira de conhecimento geográfico de impacto internacional. **Caderno de Geografia**, [s. l.], v. 30, n. 63, p. 1183, 2020.

SANTOS, J. Y. G. dos *et al.* Modeling the impacts of future LULC and climate change on runoff and sediment yield in a strategic basin in the Caatinga/Atlantic forest ecotone of Brazil. **CATENA**, [s. l.], v. 203, p. 105308, 2021.

SANTOS, H. G. *et al.* **Sistema brasileiro de classificação de solos.** [S. l.: s. n.], 2018.

SARTORI, A.; NETO, F. L.; GENOVEZ, A. M. Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [s. l.], v. 10, n. 4, p. 5–18, 2005.

SCHUOL, J.; ABBASPOUR, K. C. Calibration and uncertainty issues of a hydrological model (SWAT) applied to West Africa. **Advances in Geosciences**, [s. l.], v. 9, p. 137 – 143, 2006.

SEGOVIA-CARDOZO, D. A.; BERNAL-BASURCO, C.; RODRÍGUEZ-SINOBAS, L. Tipping Bucket Rain Gauges in Hydrological Research: Summary on Measurement Uncertainties, Calibration, and Error Reduction Strategies. **Sensors**, [s. l.], v. 23, n. 12, 2023.

SELLAMI, H. *et al.* Parameter and rating curve uncertainty propagation analysis of the SWAT model for two small Mediterranean catchments; [Analyse de la propagation des incertitudes de la courbe de tarage et des paramètres du modèle SWAT pour deux petits bassins versants. **Hydrological Sciences Journal**, [s. l.], v. 58, n. 8, p. 1635 – 1657, 2013.

ŞEN, Z. Longitudinally and laterally trench-supported subsurface dam innovative design procedures. **Water Supply**, [s. l.], v. 23, n. 2, p. 821–835, 2023.

SENET-APARICIO, J. *et al.* Impacts of swat weather generator statistics from high-resolution datasets on monthly streamflow simulation over Peninsular Spain. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, [s. l.], v. 35, n. January, p. 1–15, 2021.

SHAH, S. *et al.* Analysis of Hydrological Dynamics and Climate Change Impact in the Chuncheon Watershed with the SWAT Model. **Research Square** [Preprint]. [s. l.], p. 1–24, 2024.

SHAH, S. *et al.* Evaluating the added value of multi-variable calibration of SWAT with remotely sensed evapotranspiration data for improving hydrological modeling. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 603, 2021.

SHEIKH, M. R.; COULIBALY, P. Review of Recent Developments in Hydrologic Forecast Merging Techniques. **Water (Switzerland)**, [s. l.], v. 16, n. 2, 2024.

SHIVHARE, N.; DIKSHIT, P. K. S.; DWIVEDI, S. B. A Comparison of SWAT Model Calibration Techniques for Hydrological Modeling in the Ganga River Watershed. **Engineering**, [s. l.], v. 4, n. 5, p. 643–652, 2018.

SILVA, L. R. S. **Análise de Incertezas e Avaliação dos fatores influentes no desempenho de modelos de simulação de Bacias Hidrográficas**. 2010. 241 f. - Universidade de Brasília, [s. l.], 2010.

SILVA, T. P. *et al.* Evaluating hydrological and soil erosion processes in different time scales and land uses in southern Brazilian paired watersheds. **Hydrological Sciences Journal**, [s. l.], v. 00, n. 00, p. 1–18, 2023.

SINGH, A.; JHA, S. K. Identification of sensitive parameters in daily and monthly hydrological simulations in small to large catchments in Central India. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 601, p. 126632, 2021.

SLEZIAK, P.; DANKO, M.; HOLKO, L. Testing of an Alternative Approach To Calibration of a Hydrological Model Under Varying Climatic Conditions. **Acta Hydrologica Slovaca**, [s. l.], v. 20, n. 2, p. 131–138, 2019.

SMIT, E. *et al.* Model calibration using hydopedological insights to improve the simulation of internal hydrological processes using SWAT+. **Hydrological Processes**, [s. l.], v. 38, n. 5, p. 1–16, 2024.

SOBOL, I. M. Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates. **Mathematics and Computers in Simulation**, [s. l.], v. 55, p. 271–280, 2001.

STEINMETZ, A. A. **Impacto das mudanças climáticas sobre as vazões em bacias hidrográficas do Pampa brasileiro**. 2020. 163 f. - Universidade Federal de Pelotas, [s. l.], 2020.

SUZUKI, L. E. A. S. *et al.* Capacidade de uso e aptidão agrícola das terras de propriedades rurais localizadas na bacia hidrográfica do Arroio Pelotas. **ForScience**, [s. l.], v. 9, n. 1, p. e00873, 2021.

TAIA, S. *et al.* The Application of SWAT Model and Remotely Sensed Products to Characterize the Dynamic of Streamflow and Snow in a Mountainous Watershed in the High Atlas. **Sensors**, [s. l.], v. 23, n. 3, 2023.

TAN, M. L. *et al.* A review of alternative climate products for SWAT modelling: Sources, assessment and future directions. **Science of the Total Environment**, [s. l.], v. 795, p. 148915, 2021.

TAPAS, M. R. *et al.* Enhancing Hydrological Predictions: Choosing Optimal Combinations of Rainfall Datasets and 2 Autocalibration Techniques for SWAT+ Flow Simulations. **SSNN Product & Services**. [Preprint]. Disponível em: <https://ssrn.com/abstract=4910313>. Acesso em: 20 jul. 2024.

TEGEGNE, G. *et al.* Hydrological modelling uncertainty analysis for different flow quantiles: a case study in two hydro-geographically different watersheds. **Hydrological Sciences Journal**, [s. l.], v. 64, n. 4, p. 473–489, 2019.

THAVHANA, M. P.; SAVAGE, M. J.; MOELETSI, M. E. SWAT model uncertainty analysis, calibration and validation for runoff simulation in the Luvuvhu River catchment, South Africa. **Physics and Chemistry of the Earth**, [s. l.], v. 105, p. 115–124, 2018.

THIEMIG, V. *et al.* Hydrological evaluation of satellite-based rainfall estimates over the Volta and Baro-Akobo Basin. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 499, p. 324–338, 2013.

TOLERA, M. B.; CHUNG, I.-M.; CHANG, S. W. Evaluation of the climate forecast system reanalysis weather data for watershed modeling in Upper Awash Basin, Ethiopia. **Water (Switzerland)**, [s. l.], v. 10, n. 6, 2018. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85048140084&doi=10.3390%2Fw10060725&partnerID=40&md5=de59a372ec548fe686fb3f276e7abf66>.

TOLSON, B. A.; SHOEMAKER, C. A. Dynamically dimensioned search algorithm for computationally efficient watershed model calibration. **Water Resources Research**, [s. l.], v. 43, n. 1, p. 1–16, 2007.

TOUREILLE, A. Water Governs the Climate on the Earth After the Sun. **International Journal of Energy and Environmental Science**, [s. l.], v. 6, n. 5, p. 128, 2021.

TRIANA, J. S. *et al.* Beyond model metrics: The perils of calibrating hydrologic models. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 578, n. June, p. 124032, 2019.

TSUCHIYA, R.; KATO, T.; JEONG, J. Development of SWAT-PADDY for Simulating Lowland Paddy Fields. **Sustainability**, [s. l.], v. 10, n. 9, p. 3246, 2016.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e aplicação**. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2012.

UFPEL, Universidade federal de Pelotas. **SYHDA - System of Hydrological Data Acquisition and Analysis**. [S. l.], 2020. Disponível em: <http://wp.ufpel.edu.br/hidrologiaemodelagemhidrologica/syhda/>. Acesso em: 1 nov. 2020.

ULIANA, E. M. *et al.* Global sensitivity analysis methods applied to hydrologic modeling with the SAC-SMA model. **Engenharia Agrícola**, [s. l.], v. 39, n. 1, p. 65–74, 2019.

USDA, United State Department of Agriculture. **Soil Conservation Service, National Engineering Hand- Book, Hydrology Section 4, Chapters 4–10**. Washington: [s. n.], 1972.

VAN GRIENSVEN, A. *et al.* A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 324, n. 1–4, p. 10–23, 2006.

VARGAS, M. M. *et al.* M-LASH: Hydrological and computational enhancements of the LASH model. **Environmental Modelling and Software**, [s. l.], v. 167, n. January 2023.

VIGIAK, O. *et al.* Adapting SWAT hillslope erosion model to predict sediment concentrations and yields in large Basins. **Science of the Total Environment**, [s. l.], v. 538, p. 855–875, 2015.

WAGNER, P. D. *et al.* Representation of hydrological processes in a rural lowland catchment in Northern Germany using SWAT and SWAT+. **Hydrological Processes**, [s. l.], v. 36, n. 5, p. 1–14, 2022.

WAGNER, C. S.; SIMON, D. F. China's use of formal science and technology agreements as a tool of diplomacy. **Science and Public Policy**, [s. l.], v. 50, n. 4, p. 807–817, 2023.

WANG, Y. *et al.* A bibliometric analysis for the research on river water quality assessment and simulation during 2000–2014. **Scientometrics**, [s. l.], v. 108, n. 3, p. 1333–1346, 2016.

WANG, Y. *et al.* *Soil and Water Assessment Tool (SWAT) Model: A Systemic Review*. **Journal of Coastal Research**, [s. l.], v. 93, n. sp1, p. 22–30, 2019.

WEI, C. *et al.* Impacts of Land Use Types, Soil Properties, and Topography on Baseflow Recharge and Prediction in an Agricultural Watershed. **Land**, [s. l.], v. 12, n. 1, p. 109, 2022.

WINCHELL, M. *et al.* **ArcSWAT 2.3.4 Interface for SWAT2005: User's Guide, Version September 2009**. Temple: Texas Agricultural Experiment Station and Agricultural Research Service-US Department of Agriculture, 2009.

WORQLUL, A. W. *et al.* Evaluating Hydrologic Responses to Soil Characteristics using SWAT model in a Paired-Watersheds in the Upper Blue Nile Basin. [s. l.], 2017.

WREGGE, M. S. *et al.* **Atlas Climático da Região Sul do Brasil: Estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul**. EMBRAPA. 2 ed. Brasília-DF: EMBRAPA, 2012.

WU, L. *et al.* Overcoming equifinality: time-varying analysis of sensitivity and identifiability of SWAT runoff and sediment parameters in an arid and semiarid watershed. **Environmental Science and Pollution Research**, [s. l.], v. 29, n. 21, p. 31631–31645, 2022.

WU, Y.; LIU, S. Automating calibration, sensitivity and uncertainty analysis of complex models using the R package Flexible Modeling Environment (FME): SWAT as an example. **Environmental Modelling and Software**, [s. l.], v. 31, p. 99–109, 2012.

XU, C. *et al.* Land-Use-Based Runoff Yield Method to Modify Hydrological Model for Flood Management: A Case in the Basin of Simple Underlying Surface. **Sustainability (Switzerland)**, [s. l.], v. 14, n. 17, 2022.

YANG, J. *et al.* Comparing uncertainty analysis techniques for a SWAT application to the Chaohe Basin in China. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 358, n. 1–2, p. 1 – 23, 2008.

YANG, W. *et al.* The impact of calibration conditions on the transferability of conceptual hydrological models under stationary and nonstationary climatic conditions. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 613, n. PA, p. 128310, 2022.

YANG, J.; ABBASPOUR, K. C.; REICHERT, P. Interfacing SWAT with systems analysis tools: a generic platform. *In*: 2005, Zurich, Switzerland. (Eds) In: Srinivasan, R., Jacobs, J., Day, D., Abbaspour. **Third International SWAT Conference Proceedings**. Zurich, Switzerland.: [s. n.], 2005. p. 169–178.

YEN, H. *et al.* A framework for propagation of uncertainty contributed by parameterization, input data, model structure, and calibration/validation data in watershed modeling. **Environmental Modelling and Software**, [s. l.], v. 54, p. 211–221, 2014.

YEN, H. *et al.* IPEAT+: A built-in optimization and automatic calibration tool of SWAT+. **Water (Switzerland)**, [s. l.], v. 11, n. 8, p. 1–17, 2019.

YEN, H.; JEONG, J.; SMITH, D. R. Evaluation of Dynamically Dimensioned Search Algorithm for Optimizing SWAT by Altering Sampling Distributions and Searching Range. **Journal of the American Water Resources Association**, [s. l.], v. 52, n. 2, p. 443–455, 2016.

ZHANG, D. *et al.* GP-SWAT (v1.0): a two-level graph-based parallel simulation tool for the SWAT model. **Geoscientific Model Development**, [s. l.], v. 14, n. 10, p. 5915–5925, 2021.

ZHANG, C.; CHU, J.; FU, G. Sobol’'s sensitivity analysis for a distributed hydrological model of Yichun River Basin, China. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 480, p. 58–68, 2013b.

ZHAO, J. *et al.* Environmental vulnerability assessment for mainland China based on entropy method. **Ecological Indicators**, [s. l.], v. 91, p. 410–422, 2018.

## APÊNDICE

**Apêndice A – Artigos obtidos após o processo de triagem e elegibilidade.**

<b>Autores</b>	<b>Título</b>	<b>DOI</b>	<b>Revista</b>	<b>Total de citações</b>	<b>Ano</b>
ARNOLD J; MORIASI D; GASSMAN P; ABBASPOUR K; WHITE M; SRINIVASAN R; SANTHI C; HARMEL R; VAN G A; VAN L M; KANNAN N; JHA M	SWAT MODEL USE CALIBRATION AND VALIDATION	Sem DOI	TRANSACTIONS OF THE ASABE	2151	2023
ABBASPOUR K; YANG J; MAXIMOV I; SIBER R; BOGNER K; MIELEITNER J; ZOBRIST J; SRINIVASAN R	MODELLING HYDROLOGY AND WATER QUALITY IN THE PREALPINE THUR WATERSHED USING SWAT	10.1016/j.jhydrol.2006.09.014	JOURNAL OF HYDROLOGY	1490	2024
ABBASPOUR K; ROUHOLAHNEJAD E; VAGHEFI S; SRINIVASAN R; YANG H; KLØVE B	A CONTINENTALS SCALE HYDROLOGY AND WATER QUALITY MODEL FOR EUROPE CALIBRATION AND UNCERTAINTY OF A HIGHRESOLUTION LARGESCALE SWAT MODEL	10.1016/j.jhydrol.2015.03.027	JOURNAL OF HYDROLOGY	1132	2023
YANG J; REICHERT P; ABBASPOUR K; XIA J; YANG H	COMPARING UNCERTAINTY ANALYSIS TECHNIQUES FOR A SWAT APPLICATION TO THE CHAOHE BASIN IN CHINA	10.1016/j.jhydrol.2008.05.012	JOURNAL OF HYDROLOGY	627	2023
MULETA M; NICKLOW J	SENSITIVITY AND UNCERTAINTY ANALYSIS COUPLED WITH AUTOMATIC CALIBRATION FOR A DISTRIBUTED WATERSHED MODEL	10.1016/j.jhydrol.2004.09.005	JOURNAL OF HYDROLOGY	427	2023
SCHUOL J; ABBASPOUR K; YANG H; SRINIVASAN R; ZEHNDER A	MODELING BLUE AND GREEN WATER AVAILABILITY IN AFRICA	10.1029/2007WR006609	WATER RESOURCES RESEARCH	287	2023
ZHANG X; SRINIVASAN R; BOSCH D	CALIBRATION AND UNCERTAINTY ANALYSIS OF THE SWAT MODEL USING GENETIC ALGORITHMS AND BAYESIAN MODEL AVERAGING	10.1016/j.jhydrol.2009.06.023	JOURNAL OF HYDROLOGY	183	2023

**Continuação do Apêndice A**

<b>Autores</b>	<b>Título</b>	<b>DOI</b>	<b>Revista</b>	<b>Total de citações</b>	<b>Ano</b>
ROSTAMIAN R; JALEH A; AFYUNI M; MOUSAVI S; FARHAD F; HEIDARPOUR M; JALALIAN A; ABBASPOUR ; KARIM C K	APPLICATION OF A SWAT MODEL FOR ESTIMATING RUNOFF AND SEDIMENT IN TWO MOUNTAINOUS BASINS IN CENTRAL IRAN	10.1623/hysj.53.5.977	HYDROLOGICAL SCIENCES JOURNAL	181	2023
NOORI N; KALIN L	COUPLING SWAT AND ANN MODELS FOR ENHANCED DAILY STREAMFLOW PREDICTION	10.1016/j.jhydrol.2015.11.050	JOURNAL OF HYDROLOGY	172	2023
STRAUCH M; BERNHOFER C; KOIDE S; VOLK M; LORZ C; MAKESCHIN F	USING PRECIPITATION DATA ENSEMBLE FOR UNCERTAINTY ANALYSIS IN SWAT STREAMFLOW SIMULATION	10.1016/j.jhydrol.2011.11.014	JOURNAL OF HYDROLOGY	167	2022
NARSIMLU B; GOSAIN A; CHAHAR B; SINGH S; SRIVASTAVA P	SWAT MODEL CALIBRATION AND UNCERTAINTY ANALYSIS FOR STREAMFLOW PREDICTION IN THE KUNWARI RIVER BASIN INDIA USING SEQUENTIAL UNCERTAINTY FITTING	10.1007/s40710-015-0064-8	ENVIRONMENTAL PROCESSES	153	2022
SHEN Z; CHEN L; CHEN T	ANALYSIS OF PARAMETER UNCERTAINTY IN HYDROLOGICAL AND SEDIMENT MODELING USING GLUE METHOD A CASE STUDY OF SWAT MODEL APPLIED TO THREE GORGES RESERVOIR REGION CHINA	10.5194/hess-16-121-2012	HYDROLOGY AND EARTH SYSTEM SCIENCES	149	2022
PERVEZ M; HENEGBRY G	ASSESSING THE IMPACTS OF CLIMATE AND LAND USE AND LAND COVER CHANGE ON THE FRESHWATER AVAILABILITY IN THE BRAHMAPUTRA RIVER BASIN	10.1016/j.ejrh.2014.09.003	JOURNAL OF HYDROLOGY: REGIONAL STUDIES	142	2022

**Continuação do Apêndice A**

<b>Autores</b>	<b>Título</b>	<b>DOI</b>	<b>Revista</b>	<b>Total de citações</b>	<b>Ano</b>
ROUHOLAHNEJAD E; ABBASPOUR K; VEJDANI M; SRINIVASAN R; SCHULIN R; LEHMANN A	A PARALLELIZATION FRAMEWORK FOR CALIBRATION OF HYDROLOGICAL MODELS	10.1016/j.envsoft.2011.12.001	ENVIRONMENTAL MODELLING AND SOFTWARE	140	2022
ZHANG X; SRINIVASAN R; ZHAO K; VAN L M	EVALUATION OF GLOBAL OPTIMIZATION ALGORITHMS FOR PARAMETER CALIBRATION OF A COMPUTATIONALLY INTENSIVE HYDROLOGIC MODEL	10.1002/hyp.7152	HYDROLOGICAL PROCESSES	131	2022
ZANG C; LIU J; VAN D V M; KRAXNER F	ASSESSMENT OF SPATIAL AND TEMPORAL PATTERNS OF GREEN AND BLUE WATER FLOWS UNDER NATURAL CONDITIONS IN INLAND RIVER BASINS IN NORTHWEST CHINA	10.5194/hess-16-2859-2012	HYDROLOGY AND EARTH SYSTEM SCIENCES	119	2022
AYELE G; TESHALE E; YU B; RUTHERFURD I; JEONG J	STREAMFLOW AND SEDIMENT YIELD PREDICTION FOR WATERSHED PRIORITIZATION IN THE UPPER BLUE NILE RIVER BASIN ETHIOPIA	10.3390/w9100782	WATER (SWITZERLAND)	117	2022
KOUCHI D; ESMAILI K; FARIDHOSSEINI A; SANAINEJAD S; KHALILI D; ABBASPOUR K	SENSITIVITY OF CALIBRATED PARAMETERS AND WATER RESOURCE ESTIMATES ON DIFFERENT OBJECTIVE FUNCTIONS AND OPTIMIZATION ALGORITHMS	10.3390/w9060384	WATER (SWITZERLAND)	111	2022
HERMAN M; NEJADHASHEMI A; ABOUALI M; HERNANDEZ-SUAREZ J; DANESHVAR F; ZHANG Z; ANDERSON M; SADEGHI A; HAIN C; SHARIFI A	EVALUATING THE ROLE OF EVAPOTRANSPIRATION REMOTE SENSING DATA IN IMPROVING HYDROLOGICAL MODELING PREDICTABILITY	10.1016/j.jhydrol.2017.11.009	JOURNAL OF HYDROLOGY	110	2022

**Continuação do Apêndice A**

<b>Autores</b>	<b>Título</b>	<b>DOI</b>	<b>Revista</b>	<b>Total de citações</b>	<b>Ano</b>
ZHANG X; SRINIVASAN R; VAN L M	ON THE USE OF MULTIALGORITHM GENETICALLY ADAPTIVE MULTIOBJECTIVE METHOD FOR MULTISITE CALIBRATION OF THE SWAT MODEL	10.1002/hyp.7528	HYDROLOGICAL PROCESSES	106	2024
VAN G A; MEIXNER T	A GLOBAL AND EFFICIENT MULTIOBJECTIVE AUTOCALIBRATION AND UNCERTAINTY ESTIMATION METHOD FOR WATER QUALITY CATCHMNT MODELS	10.2166/hydro.2007.104	JOURNAL OF HYDROINFORMATICS	102	2022
SCHUOL J; ABBASPOUR K	CALIBRATION AND UNCERTAINTY ISSUES OF A HYDROLOGICAL MODEL SWAT APPLIED TO WEST AFRICA	10.5194/adgeo-9-137-2006	ADVANCES IN GEOSCIENCES	102	2022
WORKU T; KHARE D; TRIPATHI S	MODELING RUNOFFSEDIMENT RESPONSE TO LAND USELAND COVER CHANGES USING INTEGRATED GIS AND SWAT MODEL IN THE BERESSA WATERSHED	10.1007/s12665-017-6883-3	ENVIRONMENTAL EARTH SCIENCES	101	2022
MENGISTU A; VAN R L; WOYESSA Y	TECHNIQUES FOR CALIBRATION AND VALIDATION OF SWAT MODEL IN DATA SCARCE ARID AND SEMIARID CATCHMENTS IN SOUTH AFRICA	10.1016/j.ejrh.2019.100621	JOURNAL OF HYDROLOGY: REGIONAL STUDIES	89	2022
TALEBIZADEH M; MORID S; AYYOUBZADEH S; GHASEMZADEH M	UNCERTAINTY ANALYSIS IN SEDIMENT LOAD MODELING USING ANN AND SWAT MODEL	10.1007/s11269-009-9522-2	WATER RESOURCES MANAGEMENT	87	2022
ODUSANYA A; MEHDI B; SCHÜRZ C; OKE A; AWOKOLA O; AWOMESO J; ADEJUWON J; SCHULZ K	MULTISITE CALIBRATION AND VALIDATION OF SWAT WITH SATELLITEBASED EVAPOTRANSPIRATION IN A DATASPARE CATCHMENT IN SOUTHWESTERN NIGERIA	10.5194/hess-23-1113-2019	HYDROLOGY AND EARTH SYSTEM SCIENCES	85	2022

**Continuação do Apêndice A**

<b>Autores</b>	<b>Título</b>	<b>DOI</b>	<b>Revista</b>	<b>Total de citações</b>	<b>Ano</b>
WU Y; LIU S	AUTOMATING CALIBRATION SENSITIVITY AND UNCERTAINTY ANALYSIS OF COMPLEX MODELS USING THE R PACKAGE FLEXIBLE MODELING ENVIRONMENT FME SWAT AS AN EXAMPLE	10.1016/j.envsoft.2011.11.013	ENVIRONMENTAL MODELLING AND SOFTWARE	84	2021
EVENSON G; GOLDEN H; LANE C; D'AMICO E	AN IMPROVED REPRESENTATION OF GEOGRAPHICALLY ISOLATED WETLANDS IN A WATERSHEDSCALE HYDROLOGIC MODEL	10.1002/hyp.10930	HYDROLOGICAL PROCESSES	81	2022
KUMAR N; SINGH S; SRIVASTAVA P; NARSIMLU B	SWAT MODEL CALIBRATION AND UNCERTAINTY ANALYSIS FOR STREAMFLOW PREDICTION OF THE TONS RIVER BASIN INDIA USING SEQUENTIAL UNCERTAINTY FITTING SUFI2 ALGORITHM	10.1007/s40808-017-0306-z	MODELING EARTH SYSTEMS AND ENVIRONMENT	81	2022
MULETA M; NICKLOW J	DECISION SUPPORT FOR WATERSHED MANAGEMENT USING EVOLUTIONARY ALGORITHMS	10.1061/(ASCE)0733-9496(2005)131:1(35)	JOURNAL OF WATER RESOURCES PLANNING AND MANAGEMENT	80	2022
PIANOSI F; WAGENER T	DISTRIBUTIONBASED SENSITIVITY ANALYSIS FROM A GENERIC INPUTOUTPUT SAMPLE	10.1016/j.envsoft.2018.07.019	ENVIRONMENTAL MODELLING \& SOFTWARE	80	2022
KHOI D; THOM V	PARAMETER UNCERTAINTY ANALYSIS FOR SIMULATING STREAMFLOW IN A RIVER CATCHMENT OF VIETNAM	10.1016/j.gecco.2015.10.007	GLOBAL ECOLOGY AND CONSERVATION	79	2022
ZHAO F; WU Y; QIU L; SUN Y; SUN L; LI Q; NIU J; WANG G	PARAMETER UNCERTAINTY ANALYSIS OF THE SWAT MODEL IN A MOUNTAINLOESS TRANSITIONAL WATERSHED ON THE CHINESE LOESS PLATEAU	10.3390/w10060690	WATER (SWITZERLAND)	75	2021

**Continuação do Apêndice A**

<b>Autores</b>	<b>Título</b>	<b>DOI</b>	<b>Revista</b>	<b>Total de citações</b>	<b>Ano</b>
BRIAK H; MOUSSADEK R; ABOUMARIA K; MRABET R	ASSESSING SEDIMENT YIELD IN KALAYA GAUGED WATERSHED NORTHERN MOROCCO USING GIS AND SWAT MODEL	10.1016/j.iswcr.2016.08.002	INTERNATIONAL SOIL AND WATER CONSERVATION RESEARCH	75	2022
SINGH V; BANKAR N; SALUNKHE S; BERA A; SHARMA J	HYDROLOGICAL STREAM FLOW MODELLING ON TUNGABHADRA CATCHMENT PARAMETERIZATION AND UNCERTAINTY ANALYSIS USING SWAT CUP	Sem DOI	CURRENT SCIENCE	74	2022
MEMARIAN H; BALASUNDRAM S; ABBASPOUR K; TALIB J; BOON S C; SOOD A	SWATBASED HYDROLOGICAL MODELLING OF TROPICAL LANDUSE SCENARIOS MODÉLISATION HYDROLOGIQUE DE SCÉNARIOS DUTILISATION DES SOLS EN ZONE TROPICALE À LAIDE DU MODÈLE SWAT	10.1080/02626667.2014.892598	HYDROLOGICAL SCIENCES JOURNAL	74	2022
ME W; ABELL J; HAMILTON D	EFFECTS OF HYDROLOGIC CONDITIONS ON SWAT MODEL PERFORMANCE AND PARAMETER SENSITIVITY FOR A SMALL MIXED LAND USE CATCHMENT IN NEW ZEALAND	10.5194/hess-19-4127-2015	HYDROLOGY AND EARTH SYSTEM SCIENCES	70	2022
GETACHEW B; MANJUNATHA B; BHAT H	MODELING PROJECTED IMPACTS OF CLIMATE AND LAND USE/LAND COVER CHANGES ON HYDROLOGICAL RESPONSES IN THE LAKE TANA BASIN UPPER BLUE NILE RIVER BASIN ETHIOPIA	10.1016/j.jhydrol.2021.125974	JOURNAL OF HYDROLOGY	69	2022
CHEN H; LUO Y; POTTER C; MORAN P; GRIENEISEN M; ZHANG M	MODELING PESTICIDE DIURON LOADING FROM THE SAN JOAQUIN WATERSHED INTO THE SACRAMENTOSAN JOAQUIN DELTA USING SWAT	10.1016/j.watres.2017.05.032	WATER RESEARCH	69	2022

**Continuação do Apêndice A**

<b>Autores</b>	<b>Título</b>	<b>DOI</b>	<b>Revista</b>	<b>Total de citações</b>	<b>Ano</b>
CHANAPATHI T; THATIKONDA S	INVESTIGATING THE IMPACT OF CLIMATE AND LANDUSE LAND COVER CHANGES ON HYDROLOGICAL PREDICTIONS OVER THE KRISHNA RIVER BASIN UNDER PRESENT AND FUTURE SCENARIOS	10.1016/j.scitotenv.2020.137736	SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT	68	2022
CHAEMISO S; ABEBE A; PINGALE S	ASSESSMENT OF THE IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON SURFACE HYDROLOGICAL PROCESSES USING SWAT A CASE STUDY OF OMOGIBE RIVER BASIN ETHIOPIA	10.1007/s40808-016-0257-9	MODELING EARTH SYSTEMS AND ENVIRONMENT	68	2022
BEGOU J; JOMAA S; BENABDALLAH S; BAZIE P; AFOUDA A; RODE M	MULTISITE VALIDATION OF THE SWAT MODEL ON THE BANI CATCHMENT MODEL PERFORMANCE AND PREDICTIVE UNCERTAINTY	10.3390/w8050178	WATER (SWITZERLAND)	67	2022
SISAY E; HALEFOM A; KHARE D; SINGH L; WORKU T	HYDROLOGICAL MODELLING OF UNGAUGED URBAN WATERSHED USING SWAT MODEL	10.1007/s40808-017-0328-6	MODELING EARTH SYSTEMS AND ENVIRONMENT	66	2020
ROUHOLAHNEJAD E; ABBASPOUR K; SRINIVASAN R; BACU V; LEHMANN A	WATER RESOURCES OF THE BLACK SEA BASIN AT HIGH SPATIAL AND TEMPORAL RESOLUTION	10.1002/2013WR014132	WATER RESOURCES RESEARCH	64	2020
NAZARI-SHARABIAN M; TAHERIYOUN M; AHMAD S; KARAKOUZIAN M; AHMADI A	WATER QUALITY MODELING OF MAHABAD DAM WATERSHEDRESERVOIR SYSTEM UNDER CLIMATE CHANGE CONDITIONS USING SWAT AND SYSTEM DYNAMICS	10.3390/w11020394	WATER (SWITZERLAND)	63	2019
LETA O; NOSSENT J; VELEZ C; SHRESTHA ; NARAYAN K N; VAN G A; BAUWENS W	ASSESSMENT OF THE DIFFERENT SOURCES OF UNCERTAINTY IN A SWAT MODEL OF THE RIVER SENNE BELGIUM	10.1016/j.envsoft.2015.02.010	ENVIRONMENTAL MODELLING \& SOFTWARE	63	2020

**Continuação do Apêndice A**

<b>Autores</b>	<b>Título</b>	<b>DOI</b>	<b>Revista</b>	<b>Total de citações</b>	<b>Ano</b>
SHIVHARE N; DIKSHIT P; DWIVEDI S	A COMPARISON OF SWAT MODEL CALIBRATION TECHNIQUES FOR HYDROLOGICAL MODELING IN THE GANGA RIVER WATERSHED	10.1016/j.eng.2018.08.012	ENGINEERING	58	2020
SHI Y; XU G; WANG Y; ENGEL B; PENG H; ZHANG W; CHENG M; DAI M	MODELLING HYDROLOGY AND WATER QUALITY PROCESSES IN THE PENGXI RIVER BASIN OF THE THREE GORGES RESERVOIR USING THE <i>SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL</i>	10.1016/j.agwat.2016.12.007	AGRICULTURAL WATER MANAGEMENT	58	2020
HALLOUZ F; MEDDI M; MAHÉ G; ALIRAHMANI S; KEDDAR A	MODELING OF DISCHARGE AND SEDIMENT TRANSPORT THROUGH THE SWAT MODEL IN THE BASIN OF HARRAZA NORTHWEST OF ALGERIA	10.1016/j.wsj.2017.12.004	WATER SCIENCE	57	2019
WORQLUL A; AYANA E; YEN H; JEONG J; MACALISTER C; TAYLOR R; GERIK T; STEENHUIS T	EVALUATING HYDROLOGIC RESPONSES TO SOIL CHARACTERISTICS USING SWAT MODEL IN A PAIRED WATERSHEDS IN THE UPPER BLUE NILE BASIN	10.1016/j.catena.2017.12.040	CATENA	56	2019
ABBASPOUR K; VAGHEFI S; YANG H; SRINIVASAN ; R. R	GLOBAL SOIL LANDUSE EVAPOTRANSPIRATION HISTORICAL AND FUTURE WEATHER DATABASES FOR SWAT APPLICATIONS	10.1038/s41597-019-0282-4	SCIENTIFIC DATA	56	2020
CAO Y; ZHANG J; YANG M; LEI X; GUO B; YANG L; ZENG Z; QU J	APPLICATION OF SWAT MODEL WITH CMADS DATA TO ESTIMATE HYDROLOGICAL ELEMENTS AND PARAMETER UNCERTAINTY BASED ON SUFI2 ALGORITHM IN THE LIJIANG RIVER BASIN CHINA	10.3390/w10060742	WATER (SWITZERLAND)	55	2021
DUMEDAH G; BERG A; WINEBERG M; COLLIER R	SELECTING MODEL PARAMETER SETS FROM A TRADEOFF SURFACE GENERATED FROM THE NONDOMINATED SORTING GENETIC ALGORITHM II	10.1007/s11269-010-9668-y	WATER RESOURCES MANAGEMENT	52	2019

**Continuação do Apêndice A**

<b>Autores</b>	<b>Título</b>	<b>DOI</b>	<b>Revista</b>	<b>Total de citações</b>	<b>Ano</b>
HA L; BASTIAANSEN W; VAN G A; VAN D A; SENAY G	CALIBRATION OF SPATIALLY DISTRIBUTED HYDROLOGICAL PROCESSES AND MODEL PARAMETERS IN SWAT USING REMOTE SENSING DATA AND AN AUTOCALIBRATION PROCEDURE A CASE STUDY IN A VIETNAMESE RIVER BASIN	10.3390/w10020212	WATER (SWITZERLAND)	51	2019
NOTTER B; HURNI H; WIESMANN U; ABBASPOUR K	MODELLING WATER PROVISION AS AN ECOSYSTEM SERVICE IN A LARGE EAST AFRICAN RIVER BASIN	10.5194/hess-16-69-2012	HYDROLOGY AND EARTH SYSTEM SCIENCES	51	2021
JAJARMIZADEH M; KAKAEI L E; HARUN S; AHMADI A	APPLICATION OF SVM AND SWAT MODELS FOR MONTHLY STREAMFLOW PREDICTION A CASE STUDY IN SOUTH OF IRAN	10.1007/s12205-014-0060-y	KSCE JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING	50	2019
BRIGHENTI T; BONUMÁ N; GRISON F; MOTA A; KOBIYAMA M; CHAFFE P	TWO CALIBRATION METHODS FOR MODELING STREAMFLOW AND SUSPENDED SEDIMENT WITH THE SWAT MODEL	10.1016/j.ecoleng.2018.11.007	ECOLOGICAL ENGINEERING	49	2017
AGA A; CHANE B; MELESSE A	SOIL EROSION MODELLING AND RISK ASSESSMENT IN DATA SCARCE RIFT VALLEY LAKE REGIONS ETHIOPIA	10.3390/w10111684	WATER (SWITZERLAND)	49	2018
POHLERT T; HUISMAN J; BREUER L; FREDE H	INTEGRATION OF A DETAILED BIOGEOCHEMICAL MODEL INTO SWAT FOR IMPROVED NITROGEN PREDICTIONS MODEL DEVELOPMENT SENSITIVITY AND GLUE ANALYSIS	10.1016/j.ecolmodel.2006.11.019	ECOLOGICAL MODELLING	49	2018
WU J; YEN H; ARNOLD J; YANG Y; CAI X; WHITE M; SANTHI C; MIAO ; CHIYUAN C; SRINIVASAN R	DEVELOPMENT OF RESERVOIR OPERATION FUNCTIONS IN SWAT PLUS FOR NATIONAL ENVIRONMENTAL ASSESSMENTS	10.1016/j.jhydrol.2020.124556	JOURNAL OF HYDROLOGY	49	2016

**Continuação do Apêndice A**

<b>Autores</b>	<b>Título</b>	<b>DOI</b>	<b>Revista</b>	<b>Total de citações</b>	<b>Ano</b>
SELLAMI H; LA J I; BENABDALLAH S; BAGHDADI N; VANCLOOSTER M	UNCERTAINTY ANALYSIS IN MODEL PARAMETERS REGIONALIZATION A CASE STUDY INVOLVING THE SWAT MODEL IN MEDITERRANEAN CATCHMENTS SOUTHERN FRANCE	10.5194/hess-18-2393-2014	HYDROLOGY AND EARTH SYSTEM SCIENCES	49	2018
MELAKU N; RENSCHLER C; HOLZMANN H; STROHMEIER S; BAYU W; ZUCCA C; ZIADAT F; KLIK A	PREDICTION OF SOIL AND WATER CONSERVATION STRUCTURE IMPACTS ON RUNOFF AND EROSION PROCESSES USING SWAT MODEL IN THE NORTHERN ETHIOPIAN HIGHLANDS	10.1007/s11368-017-1901-3	JOURNAL OF SOILS AND SEDIMENTS	48	2017
LIU G; SCHWARTZ F; TSENG K; SHUM C	DISCHARGE AND WATERDEPTH ESTIMATES FOR UNGAUGED RIVERS COMBINING HYDROLOGIC HYDRAULIC AND INVERSE MODELING WITH STAGE AND WATERAREA MEASUREMENTS FROM SATELLITES	10.1002/2015WR016971	WATER RESOURCES RESEARCH	48	2018
SAO D; KATO T; TU L; THOUK P; FITRIYAH A; OEURNG C	EVALUATION OF DIFFERENT OBJECTIVE FUNCTIONS USED IN THE SUFI2 CALIBRATION PROCESS OF SWATCUP ON WATER BALANCE ANALYSIS A CASE STUDY OF THE PURSAT RIVER BASIN CAMBODIA	10.3390/w12102901	WATER (SWITZERLAND)	47	2018
CHANAPATHI T; THATIKONDA S; RAGHAVAN S	ANALYSIS OF RAINFALL EXTREMES AND WATER YIELD OF KRISHNA RIVER BASIN UNDER FUTURE CLIMATE SCENARIOS	10.1016/j.ejrh.2018.10.004	JOURNAL OF HYDROLOGY: REGIONAL STUDIES	47	2018
SINGH A; IMTIYAZ M; ISAAC R; DENIS D	ASSESSING THE PERFORMANCE AND UNCERTAINTY ANALYSIS OF THE SWAT AND RBNN MODELS FOR SIMULATION OF SEDIMENT YIELD IN THE NAGWA WATERSHED INDIA	10.1080/02626667.2013.872787	HYDROLOGICAL SCIENCES JOURNAL	47	2017

**Continuação do Apêndice A**

<b>Autores</b>	<b>Título</b>	<b>DOI</b>	<b>Revista</b>	<b>Total de citações</b>	<b>Ano</b>
VENKATESH K; PREETHI K; RAMESH H	EVALUATING THE EFFECTS OF FOREST FIRE ON WATER BALANCE USING FIRE SUSCEPTIBILITY MAPS	10.1016/j.ecolind.2019.105856	ECOLOGICAL INDICATORS	46	2017
ANG R; OEURNG C	SIMULATING STREAMFLOW IN AN UNGAUGED CATCHMENT OF TONLESAP LAKE BASIN IN CAMBODIA USING SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL SWAT MODEL	10.1016/j.wsj.2017.12.002	WATER SCIENCE	46	2018
THAVHANA M; SAVAGE M; MOELETSI M	SWAT MODEL UNCERTAINTY ANALYSIS CALIBRATION AND VALIDATION FOR RUNOFF SIMULATION IN THE LUVUVHU RIVER CATCHMENT SOUTH AFRICA	10.1016/j.pce.2018.03.012	PHYSICS AND CHEMISTRY OF THE EARTH	45	2018
SHAHVARI N; KHALILIAN S; MOSAVI S; MORTAZAVI S	ASSESSING CLIMATE CHANGE IMPACTS ON WATER RESOURCES AND CROP YIELD A CASE STUDY OF VARAMIN PLAIN BASIN IRAN	10.1007/s10661-019-7266-x	ENVIRONMENTAL MONITORING AND ASSESSMENT	45	2018
KOYCEGIZ C; BUYUKYILDIZ M	CALIBRATION OF SWAT AND TWO DATADRIVEN MODELS FOR A DATASCARCE MOUNTAINOUS HEADWATER IN SEMIARID KONYA CLOSED BASIN	10.3390/w11010147	WATER (SWITZERLAND)	43	2017
KUMARASAMY K; BELMONT P	CALIBRATION PARAMETER SELECTION AND WATERSHED HYDROLOGY MODEL EVALUATION IN TIME AND FREQUENCY DOMAINS	10.3390/w10060710	WATER (SWITZERLAND)	43	2019
ROCHA J; ROEBELING P; RIAL-RIVAS M	ASSESSING THE IMPACTS OF SUSTAINABLE AGRICULTURAL PRACTICES FOR WATER QUALITY IMPROVEMENTS IN THE VOUGA CATCHMENT PORTUGAL USING THE SWAT MODEL	10.1016/j.scitotenv.2015.07.038	SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT	43	2018

**Continuação do Apêndice A**

<b>Autores</b>	<b>Título</b>	<b>DOI</b>	<b>Revista</b>	<b>Total de citações</b>	<b>Ano</b>
ALMEIDA R; PEREIRA S; PINTO D	CALIBRATION AND VALIDATION OF THE SWAT HYDROLOGICAL MODEL FOR THE MUCURI RIVER BASIN	10.1590/1809-4430-eng.agric.v38n1p55-63/2018	ENGENHARIA AGRICOLA	42	2019
ERCAN M; GOODALL J	DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A GENERAL SOFTWARE LIBRARY FOR USING NSGAII WITH SWAT FOR MULTIOBJECTIVE MODEL CALIBRATION	10.1016/j.envsoft.2016.06.017	ENVIRONMENTAL MODELLING AND SOFTWARE	42	2017
CUCELOGLU G; ABBASPOUR K; OZTURK I	ASSESSING THE WATERRESOURCES POTENTIAL OF ISTANBUL BY USING A SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL SWAT HYDROLOGICAL MODEL	10.3390/w9100814	WATER (SWITZERLAND)	41	2018
HUO A; YANG L; LUO P; CHENG Y; PENG J; NOVER D	INFLUENCE OF LANDFILL AND LAND USE SCENARIO ON RUNOFF EVAPOTRANSPIRATION AND SEDIMENT YIELD OVER THE CHINESE LOESS PLATEAU	10.1016/j.ecolind.2020.107208	ECOLOGICAL INDICATORS	40	2018
FANG G; YANG J; CHEN Y; LI Z; JI H; DE M P	HOW HYDROLOGIC PROCESSES DIFFER SPATIALLY IN A LARGE BASIN MULTISITE AND MULTIOBJECTIVE MODELING IN THE TARIM RIVER BASIN	10.1029/2018JD028423	JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH: ATMOSPHERES	40	2017
NÄSCHEN K; DIEKKRÜGER B; LEEMHUIS C; STEINBACH S; SEREGINA L; THONFELD F; VAN D L R	HYDROLOGICAL MODELING IN DATASCARCE CATCHMENTS THE KILOMBERO FLOODPLAIN IN TANZANIA	10.3390/w10050599	WATER (SWITZERLAND)	40	2019
HOSSEINI S; KHALEGHI M	APPLICATION OF SWAT MODEL AND SWATCUP SOFTWARE IN SIMULATION AND ANALYSIS OF SEDIMENT UNCERTAINTY IN ARID AND SEMIARID WATERSHEDS CASE STUDY THE ZOSHKABARDEH WATERSHED	10.1007/s40808-020-00846-2	MODELING EARTH SYSTEMS AND ENVIRONMENT	39	2018

**Continuação do Apêndice A**

<b>Autores</b>	<b>Título</b>	<b>DOI</b>	<b>Revista</b>	<b>Total de citações</b>	<b>Ano</b>
HOLLAWAY M; BEVEN K; BENSKIN C; COLLINS A; L. L; EVANS R; FALLOON P; FORBER K; HISCOCK K; KAHANA R; MACLEOD C; OCKENDEN M; VILLAMIZAR ; M. L M; WEARING C; WITHERS P; ZHOU J; BARBER ; N. J N; HAYGARTH P	THE CHALLENGES OF MODELLING PHOSPHORUS IN A HEADWATER CATCHMENT APPLYING A LIMITS OF ACCEPTABILITY UNCERTAINTY FRAMEWORK TO A WATER QUALITY MODEL	10.1016/j.jhydrol.2018.01.063	JOURNAL OF HYDROLOGY	38	2018
AAWAR T; KHARE D	ASSESSMENT OF CLIMATE CHANGE IMPACTS ON STREAMFLOW THROUGH HYDROLOGICAL MODEL USING SWAT MODEL A CASE STUDY OF AFGHANISTAN	10.1007/s40808-020-00759-0	MODELING EARTH SYSTEMS AND ENVIRONMENT	37	2018
EMAMI F; KOCH M	MODELING THE IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON WATER AVAILABILITY IN THE ZARRINE RIVER BASIN AND INFLOW TO THE BOUKAN DAM IRAN	10.3390/cli7040051	CLIMATE	37	2018
ZHANG D; CHEN X; YAO H; JAMES A	MOVING SWAT MODEL CALIBRATION AND UNCERTAINTY ANALYSIS TO AN ENTERPRISE HADOOPBASED CLOUD	10.1016/j.envsoft.2016.06.024	ENVIRONMENTAL MODELLING AND SOFTWARE	37	2018
ATHIRA P; SUDHEER K; CIBIN R; CHAUBEY I	PREDICTIONS IN UNGAUGED BASINS AN APPROACH FOR REGIONALIZATION OF HYDROLOGICAL MODELS CONSIDERING THE PROBABILITY DISTRIBUTION OF MODEL PARAMETERS	10.1007/s00477-015-1190-6	STOCHASTIC ENVIRONMENTAL RESEARCH AND RISK ASSESSMENT	37	2019

**Continuação do Apêndice A**

<b>Autores</b>	<b>Título</b>	<b>DOI</b>	<b>Revista</b>	<b>Total de citações</b>	<b>Ano</b>
MALIK M; DAR A; JAIN M	MODELLING STREAMFLOW USING THE SWAT MODEL AND MULTISITE CALIBRATION UTILIZING SUFI2 OF SWATCUP MODEL FOR HIGH ALTITUDE CATCHMENTS NW HIMALAYAS	10.1007/s40808-021-01145-0	MODELING EARTH SYSTEMS AND ENVIRONMENT	36	2017
YEN H; PARK S; ARNOLD J; SRINIVASAN R; CHAWANDA C; WANG R; FENG Q; WU J; MIAO C; BIEGER K; DAGGUPATI P; VAN G A; KALIN L; LEE S; SHESHUKOV A; WHITE M; YUAN Y; YEO I; ZHANG M; ZHANG X	IPEAT A BUILTIN OPTIMIZATION AND AUTOMATIC CALIBRATION TOOL OF SWAT	10.3390/w11081681	WATER (SWITZERLAND)	36	2017
ACERO T J; CHU M; GUZMAN J; MORIASI D; STEINER J	BEYOND MODEL METRICS THE PERILS OF CALIBRATING HYDROLOGIC MODELS	10.1016/j.jhydrol.2019.124032	JOURNAL OF HYDROLOGY	36	2016
ZHANG W; ZHA X; LI J; LIANG W; MA Y; FAN D; LI S	SPATIOTEMPORAL CHANGE OF BLUE WATER AND GREEN WATER RESOURCES IN THE HEADWATER OF YELLOW RIVER BASIN CHINA	10.1007/s11269-014-0769-x	WATER RESOURCES MANAGEMENT	36	2018
KIPROTICH P; WEI X; ZHANG Z; NGIGI T; QIU F; WANG L	ASSESSING THE IMPACT OF LAND USE AND CLIMATE CHANGE ON SURFACE RUNOFF RESPONSE USING GRIDDED OBSERVATIONS AND SWAT	10.3390/hydrology8010048	HYDROLOGY	35	2018
ROTH V; NIGUSSIE T; LEMANN T	MODEL PARAMETER TRANSFER FOR STREAMFLOW AND SEDIMENT LOSS PREDICTION WITH SWAT IN A TROPICAL WATERSHED	10.1007/s12665-016-6129-9	ENVIRONMENTAL EARTH SCIENCES	35	2017

**Continuação do Apêndice A**

<b>Autores</b>	<b>Título</b>	<b>DOI</b>	<b>Revista</b>	<b>Total de citações</b>	<b>Ano</b>
SELLAMI H; LA J I; BENABDALLAH S; VANCLOOSTER M	PARAMETER AND RATING CURVE UNCERTAINTY PROPAGATION ANALYSIS OF THE SWAT MODEL FOR TWO SMALL MEDITERRANEAN CATCHMENTS ANALYSE DE LA PROPAGATION DES INCERTITUDES DE LA COURBE DE TARAGE ET DES PARAMÈTRES DU MODÈLE SWAT POUR DEUX PETITS BASSINS VERSANTS DE LA RÉGION MÉDITERRANÉENNE	10.1080/02626667.2013.837222	HYDROLOGICAL SCIENCES JOURNAL	35	2019
YESUF H; MELESSE A; ZELEKE G; ALAMIREW T	STREAMFLOW PREDICTION UNCERTAINTY ANALYSIS AND VERIFICATION OF SWAT MODEL IN A TROPICAL WATERSHED	10.1007/s12665-016-5636-z	ENVIRONMENTAL EARTH SCIENCES	35	2018
DA S R; DANTAS J; DE A B J; SANTOS C	HYDROLOGICAL SIMULATION IN A TROPICAL HUMID BASIN IN THE CERRADO BIOME USING THE SWAT MODEL	10.2166/nh.2018.222	HYDROLOGY RESEARCH	34	2018
DAKHLALLA A; PARAJULI P	ASSESSING MODEL PARAMETERS SENSITIVITY AND UNCERTAINTY OF STREAMFLOW SEDIMENT AND NUTRIENT TRANSPORT USING SWAT	10.1016/j.inpa.2018.08.007	INFORMATION PROCESSING IN AGRICULTURE	33	2017
DAKHLALLA A; PARAJULI P	EVALUATION OF THE BEST MANAGEMENT PRACTICES AT THE WATERSHED SCALE TO ATTENUATE PEAK STREAMFLOW UNDER CLIMATE CHANGE SCENARIOS	10.1007/s11269-015-1202-9	WATER RESOURCES MANAGEMENT	33	2016
XUE C; CHEN B; WU H	PARAMETER UNCERTAINTY ANALYSIS OF SURFACE FLOW AND SEDIMENT YIELD IN THE HUOLIN BASIN CHINA	10.1061/(ASCE)HE.1943- 5584.0000909	JOURNAL OF HYDROLOGIC ENGINEERING	33	2018

**Continuação do Apêndice A**

<b>Autores</b>	<b>Título</b>	<b>DOI</b>	<b>Revista</b>	<b>Total de citações</b>	<b>Ano</b>
RAFEE S; UVO C; MARTINS J; DOMINGUES L; RUDKE A; FUJITA T; FREITAS E	LARGESCALE HYDROLOGICAL MODELLING OF THE UPPER PARANÁ RIVER BASIN	10.3390/w11050882	WATER (SWITZERLAND)	32	2017
NAZARI-SHARABIAN M; TAHERIYOUN M; KARAKOUZIAN M	SENSITIVITY ANALYSIS OF THE DEM RESOLUTION AND EFFECTIVE PARAMETERS OF RUNOFF YIELD IN THE SWAT MODEL A CASE STUDY	10.2166/aqua.2019.044	JOURNAL OF WATER SUPPLY: RESEARCH AND TECHNOLOGY - AQUA	32	2018
DAS B; JAIN S; SINGH S; THAKUR P	EVALUATION OF MULTISITE PERFORMANCE OF SWAT MODEL IN THE GOMTI RIVER BASIN INDIA	10.1007/s13201-019-1013-x	APPLIED WATER SCIENCE	32	2017
KHATUN S; SAHANA M; JAIN S; JAIN N	SIMULATION OF SURFACE RUNOFF USING SEMI DISTRIBUTED HYDROLOGICAL MODEL FOR A PART OF SATLUJ BASIN PARAMETERIZATION AND GLOBAL SENSITIVITY ANALYSIS USING SWAT CUP	10.1007/s40808-018-0474-5	MODELING EARTH SYSTEMS AND ENVIRONMENT	32	2016
AHMADI M; ARABI M; HOAG D; ENGEL B	A MIXED DISCRETECONTINUOUS VARIABLE MULTIOBJECTIVE GENETIC ALGORITHM FOR TARGETED IMPLEMENTATION OF NONPOINT SOURCE POLLUTION CONTROL PRACTICES	10.1002/2013WR013656	WATER RESOURCES RESEARCH	32	2018
GASHAW T; DILE Y; WORQLUL A; BANTIDER A; ZELEKE G; BEWKET W; ALAMIREW T	EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF BEST MANAGEMENT PRACTICES ON SOIL EROSION REDUCTION USING THE SWAT MODEL FOR THE CASE OF GUMARA WATERSHED ABBAY UPPER BLUE NILE BASIN	10.1007/s00267-021-01492-9	ENVIRONMENTAL MANAGEMENT	31	2017

**Continuação do Apêndice A**

<b>Autores</b>	<b>Título</b>	<b>DOI</b>	<b>Revista</b>	<b>Total de citações</b>	<b>Ano</b>
TOLERA M; CHUNG I; CHANG S	EVALUATION OF THE CLIMATE FORECAST SYSTEM REANALYSIS WEATHER DATA FOR WATERSHED MODELING IN UPPER AWASH BASIN ETHIOPIA	10.3390/w10060725	WATER (SWITZERLAND)	30	2017
ZHANG J; LI Q; GUO B; GONG H	THE COMPARATIVE STUDY OF MULTISITE UNCERTAINTY EVALUATION METHOD BASED ON SWAT MODEL	10.1002/hyp.10380	HYDROLOGICAL PROCESSES	30	2016
JAJARMIZADEH M; SIDEK L; MIRZAI M; ALAGHMAND S; HARUN S; MAJID M	PREDICTION OF SURFACE FLOW BY FORCING OF CLIMATE FORECAST SYSTEM REANALYSIS DATA	10.1007/s11269-016-1303-0	WATER RESOURCES MANAGEMENT	29	2018
ANDERSSON J; ZEHNDER A; JEWITT G; YANG H	WATER AVAILABILITY DEMAND AND RELIABILITY OF IN SITU WATER HARVESTING IN SMALLHOLDER RAINFED AGRICULTURE IN THE THUKELA RIVER BASIN SOUTH AFRICA	10.5194/hess-13-2329-2009	HYDROLOGY AND EARTH SYSTEM SCIENCES	28	2019
FRANCO A; BONUMÁ N	MULTIVARIABLE SWAT MODEL CALIBRATION WITH REMOTELY SENSED EVAPOTRANSPIRATION AND OBSERVED FLOW CALIBRAÇÃO MULTIVARIÁVEL DO MODELO SWAT COM EVAPOTRANSPIRAÇÃO PROVENIENTE DE SENSORIAMENTO REMOTO E VAZÃO OBSERVADA	10.1590/2318-0331.011716090	REVISTA BRASILEIRA DE RECURSOS HIDRICOS	27	2018
GONG Y; SHEN Z; LIU R; HONG Q; WU X	A COMPARISON OF SINGLE AND MULTIGAUGE BASED CALIBRATIONS FOR HYDROLOGICAL MODELING OF THE UPPER DANING RIVER WATERSHED IN CHINAS THREE GORGES RESERVOIR REGION	10.2166/nh.2012.021	HYDROLOGY RESEARCH	27	2012

**Continuação do Apêndice A**

<b>Autores</b>	<b>Título</b>	<b>DOI</b>	<b>Revista</b>	<b>Total de citações</b>	<b>Ano</b>
RAI P; DHANYA C; CHAHAR B	COUPLING OF 1D MODELS SWAT AND SWMM WITH 2D MODEL IIRIC FOR MAPPING INUNDATION IN BRAHMANI AND BAITARANI RIVER DELTA	10.1007/s11069-018-3281-4	NATURAL HAZARDS	25	2016
BRIGHENTI T; BONUMÁ N; CHAFFE P	HIERARCHICAL CALIBRATION OF SWAT MODEL FOR A WATERSHED IN SOUTHERN BRAZIL CALIBRAÇÃO HIERÁRQUICA DO MODELO SWAT EM UMA BACIA HIDROGRÁFICA CATARINENSE	10.21168/rbrh.v21n1.p53-64	REVISTA BRASILEIRA DE RECURSOS HIDRICOS	25	2013
EMIRU N; RECHA J; THOMPSON J; BELAY A; AYNEKULU E; MANYEVERE A; DEMISSIE T; OSANO P; HUSSEIN J; MOLLA M; MENGISTU G; SOLOMON D	IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON THE HYDROLOGY OF THE UPPER AWASH RIVER BASIN ETHIOPIA	10.3390/hydrology9010003	HYDROLOGY	24	2016
WALLACE C; FLANAGAN D; ENGEL B	EVALUATING THE EFFECTS OF WATERSHED SIZE ON SWAT CALIBRATION	10.3390/w10070898	WATER (SWITZERLAND)	24	2012
YEN H; LU S; FENG Q; WANG R; GAO J; BRADY D; SHARIFI A; AHN J; CHEN S; JEONG J; WHITE M; ARNOLD J	ASSESSMENT OF OPTIONAL SEDIMENT TRANSPORT FUNCTIONS VIA THE COMPLEX WATERSHED SIMULATION MODEL SWAT	10.3390/w9020076	WATER (SWITZERLAND)	24	2016
PONTES L; VIOLA M; NAVES S M; BISPO D; CURI N	HYDROLOGICAL MODELING OF TRIBUTARIES OF CANTAREIRA SYSTEM SOUTHEAST BRAZIL WITH THE SWAT MODEL	10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v36n6p1037-1049/2016	ENGENHARIA AGRICOLA	24	2016

**Continuação do Apêndice A**

<b>Autores</b>	<b>Título</b>	<b>DOI</b>	<b>Revista</b>	<b>Total de citações</b>	<b>Ano</b>
HALEFOM A; SISAY E; KHARE D; SINGH L; WORKU T	HYDROLOGICAL MODELING OF URBAN CATCHMENT USING SEMIDISTRIBUTED MODEL	10.1007/s40808-017-0327-7	MODELING EARTH SYSTEMS AND ENVIRONMENT	23	2014
ZHANG Z Z; LU W L; CHU H C; CHENG W C; ZHAO Y Z	UNCERTAINTY ANALYSIS OF HYDROLOGICAL MODEL PARAMETERS BASED ON THE BOOTSTRAP METHOD A CASE STUDY OF THE SWAT MODEL APPLIED TO THE DONGLIAO RIVER WATERSHED JILIN PROVINCE NORTHEASTERN CHINA	10.1007/s11431-013-5385-0	SCIENCE CHINA-TECHNOLOGICAL SCIENCES	23	2015
MENGISTU T; CHUNG I; KIM M; CHANG S; LEE J	IMPACTS AND IMPLICATIONS OF LAND USE LAND COVER DYNAMICS ON GROUNDWATER RECHARGE AND SURFACE RUNOFF IN EAST AFRICAN WATERSHED	10.3390/w14132068	WATER (SWITZERLAND)	22	2010
ECHOGDALI F; BOUTALEB S; TAIA S; OUCHCHEN M; ID-BELQAS M; KPAN R; ABIQUI M; ASWATHI J; SAJINKUMAR K	ASSESSMENT OF SOIL EROSION RISK IN A SEMIARID CLIMATE WATERSHED USING SWAT MODEL CASE OF TATA BASIN SOUTHEAST OF MOROCCO	10.1007/s13201-022-01664-w	APPLIED WATER SCIENCE	22	2016
BENNOUR A; JIA L; MENENTI M; ZHENG C; ZENG Y; BARNIEH B; JIANG M	CALIBRATION AND VALIDATION OF SWAT MODEL BY USING HYDROLOGICAL REMOTE SENSING OBSERVABLES IN THE LAKE CHAD BASIN	10.3390/rs14061511	REMOTE SENSING	22	2012
KAMALI B; ABBASPOUR K; YANG H	ASSESSING THE UNCERTAINTY OF MULTIPLE INPUT DATASETS IN THE PREDICTION OF WATER RESOURCE COMPONENTS	10.3390/w9090709	WATER (SWITZERLAND)	22	2016

**Continuação do Apêndice A**

<b>Autores</b>	<b>Título</b>	<b>DOI</b>	<b>Revista</b>	<b>Total de citações</b>	<b>Ano</b>
YIN Z; FENG Q; YANG L; WEN X; SI J; ZOU S	LONG TERM QUANTIFICATION OF CLIMATE AND LAND COVER CHANGE IMPACTS ON STREAMFLOW IN AN ALPINE RIVER CATCHMENT NORTHWESTERN CHINA	10.3390/su9071278	SUSTAINABILITY (SWITZERLAND)	22	2014
NGUYEN T; DIETRICH J; DANG T; TRAN D; VAN D B; SARRAZIN F; ABBASPOUR K; SRINIVASAN R	AN INTERACTIVE GRAPHICAL INTERFACE TOOL FOR PARAMETER CALIBRATION SENSITIVITY ANALYSIS UNCERTAINTY ANALYSIS AND VISUALIZATION FOR THE SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL	10.1016/j.envsoft.2022.105497	ENVIRONMENTAL MODELLING AND SOFTWARE	20	2015
YEN H; WANG R; FENG Q; YOUNG C; CHEN S; TSENG W; WOLFE J; WHITE M; ARNOLD J	INPUT UNCERTAINTY ON WATERSHED MODELING EVALUATION OF PRECIPITATION AND AIR TEMPERATURE DATA BY LATENT VARIABLES USING SWAT	10.1016/j.ecoleng.2018.07.014	ECOLOGICAL ENGINEERING	19	2012
ADMAS B; GASHAW T; ADEM A; WORQLUL A; DILE Y; MOLLA E	IDENTIFICATION OF SOIL EROSION HOTSPOT AREAS FOR PRIORITIZATION OF CONSERVATION MEASURES USING THE SWAT MODEL IN RIBB WATERSHED ETHIOPIA	10.1016/j.resenv.2022.100059	RESOURCES, ENVIRONMENT AND SUSTAINABILITY	17	2015
TAKELE G; GEBRE G; GEBREMARIAM A; ENGIDA A	HYDROLOGICAL MODELING IN THE UPPER BLUE NILE BASIN USING SOIL AND WATER ANALYSIS TOOL SWAT	10.1007/s40808-021-01085-9	MODELING EARTH SYSTEMS AND ENVIRONMENT	15	2016
SARAVANAN S; SINGH L; SATHIYAMURTHI S; SIVAKUMAR V; VELUSAMY S; SHANMUGAMOORTHY M	PREDICTING PHOSPHORUS AND NITRATE LOADS BY USING SWAT MODEL IN VAMANAPURAM RIVER BASIN KERALA INDIA	10.1007/s10661-022-10786-2	ENVIRONMENTAL MONITORING AND ASSESSMENT	14	2014

**Continuação do Apêndice A**

<b>Autores</b>	<b>Título</b>	<b>DOI</b>	<b>Revista</b>	<b>Total de citações</b>	<b>Ano</b>
WU L; LIU X; CHEN J; YU Y; MA X	OVERCOMING EQUIFINALITY TIMEVARYING ANALYSIS OF SENSITIVITY AND IDENTIFIABILITY OF SWAT RUNOFF AND SEDIMENT PARAMETERS IN AN ARID AND SEMIARID WATERSHED	10.1007/s11356-022-18573-9	ENVIRONMENTAL SCIENCE AND POLLUTION RESEARCH	14	2016
GETACHEW B; MANJUNATHA B	IMPACTS OF LANDUSE CHANGE ON THE HYDROLOGY OF LAKE TANA BASIN UPPER BLUE NILE RIVER BASIN ETHIOPIA	10.1002/gch2.202200041	GLOBAL CHALLENGES	14	2016
ZHANG D; CHEN X; YAO H	SWATCSENM ENHANCING SWAT NITRATE MODULE FOR A CANADIAN SHIELD CATCHMENT	10.1016/j.scitotenv.2016.01.109	SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT	14	2016
OLIVER C; RADCLIFFE D; RISSE L; HABTESELISSIE ; M. M; MUKUNDAN R; JEONG J; HOGHOOGHI N	QUANTIFYING THE CONTRIBUTION OF ONSITE WASTEWATER TREATMENT SYSTEMS TO STREAM DISCHARGE USING THE SWAT MODEL	10.2134/jeq2013.05.0195	JOURNAL OF ENVIRONMENTAL QUALITY	14	2016
HER Y; CIBIN R; CHAUBEY I	APPLICATION OF PARALLEL COMPUTING METHODS FOR IMPROVING EFFICIENCY OF OPTIMIZATION IN HYDROLOGIC AND WATER QUALITY MODELING	Sem DOI	APPLIED ENGINEERING IN AGRICULTURE	14	2015
SERUR A; ADI K	MULTISITE CALIBRATION OF HYDROLOGICAL MODEL AND THE RESPONSE OF WATER BALANCE COMPONENTS TO LAND USE LAND COVER CHANGE IN A RIFT VALLEY LAKE BASIN IN ETHIOPIA	10.1016/j.sciaf.2022.e01093	SCIENTIFIC AFRICAN	13	2012
ZARE M; AZAM S; SAUCHYN D	EVALUATION OF SOIL WATER CONTENT USING SWAT FOR SOUTHERN SASKATCHEWAN CANADA	10.3390/w14020249	WATER (SWITZERLAND)	13	2013

**Continuação do Apêndice A**

<b>Autores</b>	<b>Título</b>	<b>DOI</b>	<b>Revista</b>	<b>Total de citações</b>	<b>Ano</b>
DUMEDAH G; BERG A; WINEBERG M	PARETOOPTIMALITY AND A SEARCH FOR ROBUSTNESS CHOOSING SOLUTIONS WITH DESIRED PROPERTIES IN OBJECTIVE SPACE AND PARAMETER SPACE	10.2166/hydro.2011.120	JOURNAL OF HYDROINFORMATICS	13	2015
ZHOU S; WANG Y; CHANG J; GUO A; LI ; ZIYAN Z	INVESTIGATING THE DYNAMIC INFLUENCE OF HYDROLOGICAL MODEL PARAMETERS ON RUNOFF SIMULATION USING SEQUENTIAL UNCERTAINTY FITTING2BASED MULTILEVELFACTORIALANALYSIS METHOD	10.3390/w10091177	WATER	13	2015
AGHAKHANI A A; HASSANZADEH Y; POURREZA-BILONDI M; AHMADI A	ANALYZING LONGTERM SPATIAL VARIABILITY OF BLUE AND GREEN WATER FOOTPRINTS IN A SEMIARID MOUNTAINOUS BASIN WITH MIROCESM MODEL CASE STUDY KASHAFROOD RIVER BASIN IRAN	10.1007/s00704-017-2309-0	THEORETICAL AND APPLIED CLIMATOLOGY	12	2015
YEN H; JEONG J; SMITH D	EVALUATION OF DYNAMICALLY DIMENSIONED SEARCH ALGORITHM FOROPTIMIZING SWAT BY ALTERING SAMPLING DISTRIBUTIONS AND SEARCHING RANGE	10.1111/1752-1688.12394	JOURNAL OF THE AMERICAN WATER RESOURCES ASSOCIATION	12	2015
WON K; CHUNG E; CHOI S	PARAMETRIC ASSESSMENT OF WATER USE VULNERABILITY VARIATIONS USING SWAT AND FUZZY TOPSIS COUPLED WITH ENTROPY	10.3390/su70912052	SUSTAINABILITY (SWITZERLAND)	12	2012
RAFIEI E A; KAPPAS M; AKHAVAN S; HOSSEINI S; ABBASPOUR K	ESTIMATION OF GROUNDWATER RECHARGE AND ITS RELATION TO LAND DEGRADATION CASE STUDY OF A SEMIARID RIVER BASIN IN IRAN	10.1007/s12665-015-4674-2	ENVIRONMENTAL EARTH SCIENCES	12	2016

**Continuação do Apêndice A**

<b>Autores</b>	<b>Título</b>	<b>DOI</b>	<b>Revista</b>	<b>Total de citações</b>	<b>Ano</b>
LI Q; CHEN X; LUO Y; LU Z; WANG Y	A NEW PARALLEL FRAMEWORK OF DISTRIBUTED SWAT CALIBRATION	10.1007/s40333-014-0041-5	JOURNAL OF ARID LAND	11	2016
RAY R; SISHODIA R; TEFERA G	EVALUATION OF GRIDDED PRECIPITATION DATA FOR HYDROLOGIC MODELING IN NORTHCENTRAL TEXAS	10.3390/rs14163860	REMOTE SENSING	10	2012
AYALEW L; BHARTI R	MODELING SEDIMENT YIELD OF RIB WATERSHED NORTHWEST ETHIOPIA	10.1080/09715010.2020.1797544	ISH JOURNAL OF HYDRAULIC ENGINEERING	10	2016
ZARE M; AZAM S; SAUCHYN D	A MODIFIED SWAT MODEL TO SIMULATE SOIL WATER CONTENT AND SOIL TEMPERATURE IN COLD REGIONS A CASE STUDY OF THE SOUTH SASKATCHEWAN RIVER BASIN IN CANADA	10.3390/su141710804	SUSTAINABILITY (SWITZERLAND)	10	2015
MEHDI B; SCHULZ K; LUDWIG R; FERBER F; LEHNER B	EVALUATING THE IMPORTANCE OF NONUNIQUE BEHAVIOURAL PARAMETER SETS ON SURFACE WATER QUALITY VARIABLES UNDER CLIMATE CHANGE CONDITIONS IN A MESOSCALE AGRICULTURAL WATERSHED	10.1007/s11269-017-1830-3	WATER RESOURCES MANAGEMENT	10	2015
HERNANDEZ-SUAREZ J; NEJADHASHEMI A; KROPP I; ABOUALI M; ZHANG Z; DEB K	EVALUATION OF THE IMPACTS OF HYDROLOGIC MODEL CALIBRATION METHODS ON PREDICTABILITY OF ECOLOGICALLY RELEVANT HYDROLOGIC INDICES	10.1016/j.jhydrol.2018.07.056	JOURNAL OF HYDROLOGY	10	2012
SUN W; YAO X; CAO N; XU Z; YU J	INTEGRATION OF SOIL HYDRAULIC CHARACTERISTICS DERIVED FROM PEDOTRANSFER FUNCTIONS INTO HYDROLOGICAL MODELS EVALUATION OF ITS EFFECTS ON SIMULATION UNCERTAINTY	10.2166/nh.2016.150	HYDROLOGY RESEARCH	10	2014

**Continuação do Apêndice A**

<b>Autores</b>	<b>Título</b>	<b>DOI</b>	<b>Revista</b>	<b>Total de citações</b>	<b>Ano</b>
HARTWICH J; SCHMIDT M; BÖLSCHER J; REINHARDT-IMJELA C; MURACH D; SCHULTE A	HYDROLOGICAL MODELLING OF CHANGES IN THE WATER BALANCE DUE TO THE IMPACT OF WOODY BIOMASS PRODUCTION IN THE NORTH GERMAN PLAIN	10.1007/s12665-016-5870-4	ENVIRONMENTAL EARTH SCIENCES	10	2016
BARNHART B; WHITTAKER G; FICKLIN D	IMPROVED STREAM TEMPERATURE SIMULATIONS IN SWAT USING NSGAI FOR AUTOMATIC MULTISITE CALIBRATION	10.13031/trans.57.10472	TRANSACTIONS OF THE ASABE	10	2014
YADUVANSHI A; SRIVASTAVA P; WORQLUL A; SINHA A	UNCERTAINTY IN A LUMPED AND A SEMIDISTRIBUTED MODEL FOR DISCHARGE PREDICTION IN GHATSHILA CATCHMENT	10.3390/w10040381	WATER	10	2012
BALU A; RAMASAMY S; SANKAR G	ASSESSMENT OF CLIMATE CHANGE IMPACT ON HYDROLOGICAL COMPONENTS OF PONNAIYAR RIVER BASIN TAMIL NADU USING CMIP6 MODELS	10.2166/wcc.2023.354	JOURNAL OF WATER AND CLIMATE CHANGE	9	2015
KUMAR A; SINGH A; GAURAV K	ASSESSING THE SYNERGIC EFFECT OF LAND USE AND CLIMATE CHANGE ON THE UPPER BETWA RIVER CATCHMENT IN CENTRAL INDIA UNDER PRESENT PAST AND FUTURE CLIMATE SCENARIOS	10.1007/s10668-022-02260-3	ENVIRONMENT, DEVELOPMENT AND SUSTAINABILITY	9	2015
MOHSENI U; AGNIHOTRI P; PANDE C; DURIN B	UNDERSTANDING THE CLIMATE CHANGE AND LAND USE IMPACT ON STREAMFLOW IN THE PRESENT AND FUTURE UNDER CMIP6 CLIMATE SCENARIOS FOR THE PARVARA MULA BASIN INDIA	10.3390/w15091753	WATER (SWITZERLAND)	9	2009

**Continuação do Apêndice A**

<b>Autores</b>	<b>Título</b>	<b>DOI</b>	<b>Revista</b>	<b>Total de citações</b>	<b>Ano</b>
DANANTO M; AGA A; YOHANNES P; SHURA L	ASSESSING THE WATERRESOURCES POTENTIAL AND SOIL EROSION HOTSPOT AREAS FOR SUSTAINABLE LAND MANAGEMENT IN THE GIDABO WATERSHED RIFT VALLEY LAKE BASIN OF ETHIOPIA	10.3390/su14095262	SUSTAINABILITY (SWITZERLAND)	9	2008
JABERZADEH M; SAREMI A; GHORBANIZADEH K H; BABAZADEH H	SWAT AND IHACRES MODELS FOR THE SIMULATION OF RAINFALLRUNOFF OF DEZ WATERSHED	10.1007/s00382-022-06215-2	CLIMATE DYNAMICS	9	2008
LOUKIKA K; KEESARA V; BURI E; SRIDHAR V	PREDICTING THE EFFECTS OF LAND USE LAND COVER AND CLIMATE CHANGE ON MUNNERU RIVER BASIN USING CAMARKOV AND <i>SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL</i>	10.3390/su14095000	SUSTAINABILITY (SWITZERLAND)	9	2009
LEMANN T; ROTH V; ZELEKE G	IMPACT OF PRECIPITATION AND TEMPERATURE CHANGES ON HYDROLOGICAL RESPONSES OF SMALLSCALE CATCHMENTS IN THE ETHIOPIAN HIGHLANDS	10.1080/02626667.2016.1217415	HYDROLOGICAL SCIENCES JOURNAL	9	2010
ATHIRA P; SUDHEER K	A METHOD TO REDUCE THE COMPUTATIONAL REQUIREMENT WHILE ASSESSING UNCERTAINTY OF COMPLEX HYDROLOGICAL MODELS	10.1007/s00477-014-0958-4	STOCHASTIC ENVIRONMENTAL RESEARCH AND RISK ASSESSMENT	9	2007
YILMAZ M; ALP H; TOSUNOĞLU F; AŞIKOĞLU L; ERIŞ E	IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON METEOROLOGICAL AND HYDROLOGICAL DROUGHTS FOR UPPER CORUH BASIN TURKEY	10.1007/s11069-022-05217-x	NATURAL HAZARDS	8	2009
HACHEMAOUI A; ELOUISSI A; BENZATER B; FELLAH S	ASSESSMENT OF THE HYDROLOGICAL IMPACT OF LAND USECOVER CHANGES IN A SEMIARID BASIN USING THE SWAT MODEL CASE OF THE OUED SAIDA BASIN IN WESTERN ALGERIA	10.1007/s40808-022-01422-6	MODELING EARTH SYSTEMS AND ENVIRONMENT	8	2007

**Continuação do Apêndice A**

<b>Autores</b>	<b>Título</b>	<b>DOI</b>	<b>Revista</b>	<b>Total de citações</b>	<b>Ano</b>
CHEN L; LI S; ZHONG Y; SHEN Z	IMPROVEMENT OF MODEL EVALUATION BY INCORPORATING PREDICTION AND MEASUREMENT UNCERTAINTY	10.5194/hess-22-4145-2018	HYDROLOGY AND EARTH SYSTEM SCIENCES	8	2005
SAMAVATI A; BABAMIRI O; REZAI Y; HEIDARIMOZAFFAR M	INVESTIGATING THE EFFECTS OF CLIMATE CHANGE ON FUTURE HYDROLOGICAL DROUGHT IN MOUNTAINOUS BASINS USING SWAT MODEL BASED ON CMIP5 MODEL	10.1007/s00477-022-02319-7	STOCHASTIC ENVIRONMENTAL RESEARCH AND RISK ASSESSMENT	7	2006
ZHU X; CHANG K; CAI W; ZHANG A; YUE G; ZHAO X	RESPONSE OF RUNOFF AND NITROGEN LOADINGS TO CLIMATE AND LAND USE CHANGES IN THE MIDDLE FENHE RIVER BASIN IN NORTHERN CHINA	10.2166/wcc.2022.121	JOURNAL OF WATER AND CLIMATE CHANGE	7	2005
NGONDO J; MANGO J; NOBERT J; DUBI A; LI X; CHENG H	HYDROLOGICAL RESPONSE OF THE WAMIRUVU BASIN TO LANDUSE AND LANDCOVER CHANGES AND ITS IMPACTS FOR THE FUTURE	10.3390/w14020184	WATER (SWITZERLAND)	7	2010
CHEN J; DU C; NIE T; HAN X; TANG S	STUDY OF NONPOINT POLLUTION IN THE ASHE RIVER BASIN BASED ON SWAT MODEL WITH DIFFERENT LAND USE	10.3390/w14142177	WATER (SWITZERLAND)	7	2008
JAJARMIZADEH M; SIDEK L; HARUN S; SALARPOUR M	OPTIMAL CALIBRATION AND UNCERTAINTY ANALYSIS OF SWAT FOR AN ARID CLIMATE	10.1177/1178622117731792	AIR, SOIL AND WATER RESEARCH	7	2014
ACHARKI S; TAIA S; ARJDAL Y; HACK J	HYDROLOGICAL MODELING OF SPATIAL AND TEMPORAL VARIATIONS IN STREAMFLOW DUE TO MULTIPLE CLIMATE CHANGE SCENARIOS IN NORTHWESTERN MOROCCO	10.1016/j.cliser.2023.100388	CLIMATE SERVICES	6	2018
PANDI D; KOTHANDARAMAN S; KUPPUSAMY M	SIMULATION OF WATER BALANCE COMPONENTS USING SWAT MODEL AT SUB CATCHMENT LEVEL	10.3390/su15021438	SUSTAINABILITY (SWITZERLAND)	6	2014

**Continuação do Apêndice A**

<b>Autores</b>	<b>Título</b>	<b>DOI</b>	<b>Revista</b>	<b>Total de citações</b>	<b>Ano</b>
LETA M; EBSA D; REGASA M	PARAMETER UNCERTAINTY ANALYSIS FOR STREAMFLOW SIMULATION USING SWAT MODEL IN NASHE WATERSHED BLUE NILE RIVER BASIN ETHIOPIA	10.1155/2022/1826942	APPLIED AND ENVIRONMENTAL SOIL SCIENCE	6	2022
BADORA D; WAWER R; NIEROBCA A; KROL- BADZIAK A; KOZYRA J; JURGA B; NOWOCIEN E	MODELLING THE HYDROLOGY OF AN UPLAND CATCHMENT OF BYSTRA RIVER IN 2050 CLIMATE USING RCP 45 AND RCP 85 EMISSION SCENARIO FORECASTS	10.3390/agriculture12030403	AGRICULTURE (SWITZERLAND)	6	2014
VAGHEEI H; LAINI A; VEZZA P; PALAU- SALVADOR G; BOANO F	ECOHYDROLOGIC MODELING USING NITRATE AMMONIUM PHOSPHORUS AND MACROINVERTEBRATES AS AQUATIC ECOSYSTEM HEALTH INDICATORS OF ALBAIDA VALLEY SPAIN	10.1016/j.ejrh.2022.101155	JOURNAL OF HYDROLOGY: REGIONAL STUDIES	6	2018
JUNQUEIRA R; VIOLA M; AMORIM J; CAMARGOS C; DE M C	HYDROLOGICAL MODELING USING REMOTE SENSING PRECIPITATION DATA IN A BRAZILIAN SAVANNA BASIN	10.1016/j.jsames.2022.103773	JOURNAL OF SOUTH AMERICAN EARTH SCIENCES	6	2019
KUMA H; FEYESSA F; DEMISSIE T	IMPACTS OF LANDUSE/LANDCOVER CHANGES ON NUTRIENT LOSSES IN AGRICULTURAL CATCHMENT SOUTHERN ETHIOPIA	10.2166/ws.2022.130	WATER SUPPLY	6	2007
KHAN S; KHAN F; GUAN Y	ASSESSMENT OF GRIDDED PRECIPITATION PRODUCTS IN THE HYDROLOGICAL MODELING OF A FLOODPRONE MESOSCALE BASIN	10.2166/NH.2021.073	HYDROLOGY RESEARCH	6	2015
YUAN L; FORSHAY K	EVALUATING MONTHLY FLOW PREDICTION BASED ON SWAT AND SUPPORT VECTOR REGRESSION COUPLED WITH DISCRETE WAVELET TRANSFORM	10.3390/w14172649	WATER (SWITZERLAND)	6	2018

**Continuação do Apêndice A**

<b>Autores</b>	<b>Título</b>	<b>DOI</b>	<b>Revista</b>	<b>Total de citações</b>	<b>Ano</b>
ALIPOUR M; HOSSEINI M; DOWLATABADI S; ALI Z S	SIMULATION OF SURFACE RUNOFF IN KARAJ DAM BASIN IRAN CONJUNCTIVE SIMULATION OF SURFACE WATER AND GROUNDWATER USING SWAT AND MODFLOW IN FIROOZABAD WATERSHED	10.1007/s13201-018-0782-y 10.1007/s12205-015-0354-8	APPLIED WATER SCIENCE KSCE JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING	6	2020
VERMA S; VERMA M; PRASAD A; MEHTA D; ISLAM M	MODELING OF UNCERTAINTY IN THE ESTIMATION OF HYDROGRAPH COMPONENTS IN CONJUNCTION WITH THE SUFI2 OPTIMIZATION ALGORITHM BY USING MULTIPLE OBJECTIVE FUNCTIONS	10.1007/s40808-023-01758-7	MODELING EARTH SYSTEMS AND ENVIRONMENT	5	2018
KOLTSIDA E; MAMASSIS N; KALLIORAS A	HYDROLOGICAL MODELING USING THE SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL IN URBAN AND PERIURBAN ENVIRONMENTS THE CASE OF KIFISOS EXPERIMENTAL SUBBASIN ATHENS GREECE	10.5194/hess-27-917-2023	HYDROLOGY AND EARTH SYSTEM SCIENCES	5	2015
PANDI D; KOTHANDARAMAN S; KASIVISWANATHAN K; KUPPUSAMY M	A CATCHMENT SCALE ASSESSMENT OF WATER BALANCE COMPONENTS A CASE STUDY OF CHITTAR CATCHMENT IN SOUTH INDIA	10.1007/s11356-022-19032-1	ENVIRONMENTAL SCIENCE AND POLLUTION RESEARCH	5	2015
KOLTSIDA E; KALLIORAS A	MULTIVARIABLE SWAT MODEL CALIBRATION USING SATELLITEBASED EVAPOTRANSPIRATION DATA AND STREAMFLOW	10.3390/hydrology9070112	HYDROLOGY	5	2014
JULICH S; BREUER L; FREDE H	INTEGRATING HETEROGENEOUS LANDSCAPE CHARACTERISTICS INTO WATERSHED SCALE MODELLING	10.5194/adgeo-31-31-2012	ADVANCES IN GEOSCIENCES	5	2013
ATHIRA P; NANDA C; SUDHEER K	A COMPUTATIONALLY EFFICIENT METHOD FOR UNCERTAINTY ANALYSIS OF SWAT MODEL SIMULATIONS	10.1007/s00477-018-1538-9	STOCHASTIC ENVIRONMENTAL RESEARCH AND RISK ASSESSMENT	5	2012

**Continuação do Apêndice A**

<b>Autores</b>	<b>Título</b>	<b>DOI</b>	<b>Revista</b>	<b>Total de citações</b>	<b>Ano</b>
CHO S; WILCOCK P; GRAN K	IMPLEMENTING LANDSCAPE CONNECTIVITY WITH TOPOGRAPHIC FILTERING MODEL A SIMULATION OF SUSPENDED SEDIMENT DELIVERY IN AN AGRICULTURAL WATERSHED	10.1016/j.scitotenv.2022.155701	SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT	5	2018
LI Y; THOMPSON J; LI H	IMPACTS OF SPATIAL CLIMATIC REPRESENTATION ON HYDROLOGICAL MODEL CALIBRATION AND PREDICTION UNCERTAINTY A MOUNTAINOUS CATCHMENT OF THREE GORGES RESERVOIR REGION CHINA	10.3390/w8030073	WATER (SWITZERLAND)	4	2016
SINGH A	MODELING STREAM FLOW WITH PREDICTION UNCERTAINTY BY USING SWAT HYDROLOGIC AND RBNN MODELS FOR AN AGRICULTURAL WATERSHED IN INDIA	10.1007/s40009-016-0436-2	NATIONAL ACADEMY SCIENCE LETTERS	2	2018
PATIL N; THAPA A; DHUNGANA S	ASSESSMENT OF HYDROLOGICAL RESPONSE UNDER CLIMATE CHANGE SCENARIOS A CASE STUDY OF SINA CATCHMENT INDIA	Sem DOI	INTERNATIONAL JOURNAL OF EARTH SCIENCES AND ENGINEERING	0	2022

**Apêndice B – Calendário agrícola para as culturas predominantes na  
bacia hidrográfica do arroio Cadeia**

Tabela 1 - Calendário agrícola, culturas e manejos adotados para a classe de uso e cobertura da terra denominada de lavouras temporárias (AGRR)

<b>Ano</b>	<b>Operação</b>	<b>Dia</b>	<b>Mês</b>	<b>Cultura</b>
1	Semeadura e início da cultura	1	Jul	
1	Aplicação de fertilizantes (ureia 300 kg ha <sup>-1</sup> “ <i>side_dress</i> ”)	16	Jul	Tabaco (TOB)
1	Aplicação de fertilizantes (ureia 300 kg ha <sup>-1</sup> - “ <i>side_dress</i> ”)	31	Jul	
1	Colheita e fim da cultura (“ <i>biomass</i> ”)	1	Nov	
1	Preparo do solo com disco de arado	7	Nov	
1	Semeadura e início da cultura	15	Nov	
1	Aplicação de fertilizantes (NPK 06-24-24 – 300 kg ha <sup>-1</sup> – “ <i>side_dress</i> ”)	15	Nov	
1	Aplicação de pesticidas ( <i>Roudup</i> / <i>Glyphosate</i> 200 kg ha <sup>-1</sup> “ <i>aerial_liquid</i> ”)	4	Dez	Milho (CORN)
1	Aplicação de fertilizantes (ureia 100 kg ha <sup>-1</sup> - “ <i>side_dress</i> ”)	9	Dez	
1	Aplicação de fertilizantes (ureia 100 kg ha <sup>-1</sup> - “ <i>side_dress</i> ”)	24	Dez	
2	Colheita e fim da cultura (“ <i>grain</i> ”)	14	Abril	
2	Preparo do solo com disco de arado	25	Jun	
2	Semeadura e início da cultura	1		
2	Aplicação de fertilizantes (ureia 300 kg ha <sup>-1</sup> “ <i>side_dress</i> ”)	16	Jul	Tabaco (TOBC)
2	Aplicação de fertilizantes (ureia 300 kg ha <sup>-1</sup> “ <i>side_dress</i> ”)	31		
2	Colheita e fim da cultura (“ <i>biomass</i> ”)	1		
2	Preparo do solo com disco de arado	5		
2	Semeadura e início da cultura	7	Nov	Soybean (SOYB)
2	Aplicação de fertilizantes (NPK 15-15-00, 300 kg ha <sup>-1</sup> – “ <i>side_dress</i> ”)	7		
2		30	Dez	
3	Aplicação de pesticidas ( <i>Roudup</i> / <i>Glyphosate</i> – 200 kg ha <sup>-1</sup> – “ <i>aerial_liquid</i> ”)	14	Jan	
3		29	Jan	
3		13	Fev	
3	Colheita e fim da cultura (“ <i>grain</i> ”)	9	Abr	

Tabela 2 - Calendário agrícola, culturas e manejos adotados para a classe de uso e cobertura da terra denominada de soja (SOYB)

Ano	Operação	Dia	Mês	Cultura
1	Semeadura e início da cultura	12	Abr	
1	Aplicação de fertilizantes (NPK 05-10-10 – 350 kg ha <sup>-1</sup> “side_dress”)	12	Abr	
1	1º Pastoreio do gado com lançamento de excremento de gado leiteiro de baixa produção	20	Mai	
1	Aplicação de fertilizantes (ureia 300 kg ha <sup>-1</sup> “side_dress”)	30	Mai	Aveia (OATS)
1	Aplicação de pesticidas (Decamine/ 2,4-D – 1 kg ha <sup>-1</sup> “aerial_liquid”)	19	Jun	
1	2º Pastoreio do gado com lançamento de excremento de gado leiteiro de baixa produção	12	Set	
1	Preparo do solo com disco de arado	1		
1	Semeadura e início da cultura	7	Nov	
1	Aplicação de fertilizantes (NPK 0-15-15 – 300 kg ha <sup>-1</sup> “side_dress”)	7		
1	Aplicação de pesticidas	30	Dez	Soja (SOYB)
2	(Roudup/ Glyphosate – 200 kg ha <sup>-1</sup> – “aerial_liquid”)	14	Jan	
2		29		
2		13	Fev	
2	Colheita e fim da cultura (“grain”)	9	Abr	
2	Preparo do solo com disco de arado	10	Abr	

Tabela 3 - Calendário agrícola, culturas e manejos adotados para a classe de uso e cobertura da terra denominada de silvicultura/eucalipto

<b>Ano</b>	<b>Operação</b>	<b>Dia</b>	<b>Mês</b>	<b>Cultura</b>
1	Plantio da cultura	15	Set	
9	1º Corte para obtenção de celulose	20	Nov	Eucalipto (EUCA)
20	2º Corte para obtenção de toras de madeira	13	Nov	