

O modelo hidrológico SWAT (*Soil & Water Assessment Tool*) no Brasil: uma revisão do passado, presente e futuro

Jadson Freire da Silva^{1*}, Rodrigo de Queiroga Miranda², Yenê Medeiros Paz³, Pedro Paulo Lima Silva⁴, Elisabeth Regina Alves Cavalcanti Silva⁵

¹Doutor em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Pesquisador do Instituto Federal do Maranhão, Brasil. (jadsonfreireufpe@hotmail.com)

²Doutor em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Pesquisador do Instituto Federal do Maranhão, Brasil.

³Doutora em Desenvolvimento e Meio Ambiente, User Experience Researcher in Emids Technologies, EMIDS, Canadá.

⁴Mestre em Geografia, Ambiente e Sociedade, Universidade Federal do Maranhão, Brasil.

⁵Doutora em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Instituto Federal do Maranhão, Brasil.

Histórico do Artigo: Submetido em: 25/06/2025 – Revisado em: 17/12/2025 – Aceito em: 17/02/2026

RESUMO

O modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) tem sido amplamente utilizado no Brasil como ferramenta de simulação hidrológica e ambiental, permitindo avaliar processos como vazão, produção de sedimentos e impactos de mudanças no uso e cobertura do solo em diferentes bacias hidrográficas. Esta pesquisa teve como objetivo realizar um levantamento e análise da produção científica relacionada às aplicações do SWAT no território brasileiro, identificando tendências metodológicas, principais áreas de estudo e desafios recorrentes na implementação do modelo. A metodologia baseou-se em revisão bibliográfica sistematizada, considerando artigos científicos publicados em periódicos nacionais e internacionais, com ênfase em estudos voltados à calibração, validação, análise de sensibilidade e simulação de cenários hidrológicos e climáticos. Os resultados evidenciam crescimento expressivo do uso do SWAT em bacias brasileiras, especialmente em regiões com forte pressão antrópica e necessidade de planejamento hídrico, destacando-se aplicações voltadas ao semiárido nordestino, bacias amazônicas e áreas agrícolas do Sudeste. Observou-se que os principais desafios incluem limitações na disponibilidade e qualidade de dados climáticos, pedológicos e hidrológicos, além da necessidade de maior refinamento espacial e integração com dados de sensoriamento remoto. Conclui-se que o SWAT apresenta elevado potencial como ferramenta de apoio à gestão ambiental e dos recursos hídricos no Brasil, sendo necessário ampliar o desenvolvimento de bases de dados regionais e aprimorar estratégias de calibração e validação para aumentar a confiabilidade das simulações em diferentes contextos hidroclimáticos.

Palavras-Chaves: SWAT, Hidrologia, Modelagem.

The Soil & Water Assessment Tool [SWAT] hydrological model in Brazil: a review of the past, present and future

ABSTRACT

The *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) model has been widely applied in Brazil as a hydrological and environmental simulation tool, enabling the assessment of processes such as streamflow, sediment yield, and the impacts of land use and land cover changes in different watersheds. This study aimed to conduct a survey and analysis of the scientific literature related to SWAT applications in Brazil, identifying methodological trends, main research focuses, and recurring challenges in model implementation. The methodology was based on a systematized literature review, considering scientific articles published in national and international journals, with emphasis on studies addressing calibration, validation, sensitivity analysis, and scenario simulations under hydrological and climatic variations. The results indicate a significant growth in SWAT applications across Brazilian basins, especially in regions under strong anthropogenic pressure and with high demand for water resources planning, including semi-arid watersheds in the Northeast, Amazon basins, and agricultural areas in the Southeast. Major challenges include limitations in the availability and quality of climatic, pedological, and hydrological data, as well as the need for improved spatial refinement and integration with remote sensing products. It is concluded that SWAT presents high potential as a decision-support tool for environmental and water resources management in Freire-Silva, J., Miranda, R. Q., Paz, Y. M., Silva, P. P. L., & Silva, E. R. A. C. (2026). O modelo hidrológico SWAT (*Soil & Water Assessment Tool*) no Brasil: uma revisão do passado, presente e futuro. *Revista Brasileira de Meio Ambiente*, v.14, n.2, p.127-161.



Brazil; however, expanding regional databases and improving calibration and validation strategies are essential to increase simulation reliability across different hydroclimatic conditions.

Keywords: SWAT, Hydrology, Modelling.

El modelo hidrológico SWAT (Soil & Water Assessment Tool) en Brasil: una revisión del pasado, el presente y el futuro

RESUMEN

El modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) ha sido ampliamente utilizado en Brasil como una herramienta de simulación hidrológica y ambiental, permitiendo evaluar procesos como el caudal, la producción de sedimentos y los impactos de los cambios en el uso y cobertura del suelo en diferentes cuencas hidrográficas. Esta investigación tuvo como objetivo realizar un levantamiento y análisis de la producción científica relacionada con las aplicaciones del SWAT en el territorio brasileño, identificando tendencias metodológicas, principales enfoques de investigación y desafíos recurrentes en la implementación del modelo. La metodología se basó en una revisión bibliográfica sistematizada, considerando artículos científicos publicados en revistas nacionales e internacionales, con énfasis en estudios orientados a la calibración, validación, análisis de sensibilidad y simulación de escenarios bajo variaciones hidrológicas y climáticas. Los resultados evidencian un crecimiento significativo del uso del SWAT en cuencas brasileñas, especialmente en regiones con fuerte presión antrópica y alta demanda de planificación hídrica, destacándose aplicaciones en el semiárido del Nordeste, cuencas amazónicas y áreas agrícolas del Sudeste. Se observó que los principales desafíos incluyen limitaciones en la disponibilidad y calidad de datos climáticos, pedológicos e hidrológicos, además de la necesidad de un mayor refinamiento espacial e integración con productos de teledetección. Se concluye que el SWAT presenta un alto potencial como herramienta de apoyo para la gestión ambiental y de los recursos hídricos en Brasil; sin embargo, es necesario ampliar bases de datos regionales y fortalecer estrategias de calibración y validación para aumentar la confiabilidad de las simulaciones en diferentes condiciones hidroclimáticas.

Palabras clave: SWAT, Hidrología, Modelización.

1. Introdução

A busca científica de retratar com maior fidelidade o meio ambiente faz criar mecanismos que auxiliam nos estudos acadêmicos como um todo. O Sensoriamento Remoto, a Fotogrametria, os Sistemas de Informação Geográficas (SIG), o monitoramento de dados e informações climáticas como a necessidade de mapear e entender os usos de solo e ocupação da terra são grandes exemplos de como a ciência tenta entender e acompanhar os processos naturais para controle e decisão.

Diferentes pesquisas ao longo dos anos já demonstraram que os pontos supracitados são de grande importância para o acompanhamento e sobretudo, produção científica e intelectual para criação de documentos que irão explicar o passado-presente e possibilitar políticas futuras para uma região de interesse (Freire-Silva et al., 2024; Paz et al., 2022; Tiburcio et al., 2023). Neste caso, o aumento de complexidade entrega não somente melhoria nas decisões, mas a integração de conceitos e dados que muitas vezes não conseguem se encontrar de modo metodológico usual. A modelagem ou os modelos multicritérios e mais complexos entram nesse escopo dando essa possibilidade de junção de dados e como consequência, informações (Miranda et al., 2025; Asgari et al., 2023; Freire-Silva et al., 2022).

Sabe-se aqui a existência de diversos modelos, contudo, dar-se-á o enfoque aos modelos Hidrológicos. De um modo geral, a modelagem hidrológica tem como proposta replicar as dinâmicas existentes em um corpo hídrico, revelando as informações quantitativas de vazão, sedimentos e outros materiais que a água tem relacionamento direto. Por tratar-se de um modelo hidrológico, as relações com a sociedade natureza é completamente próximas, uma vez que historicamente as populações fixam suas comunidades em ambientes ripários, isto é, zonas circunvizinhas aos rios (Jajarmizadeh et al., 2012; Devia et al., 2015; Aghakouchak & Habib, 2010).

Diante a diversos modelos hidrológicos existentes, o SWAT (*Soil & Water Assessment Tool*) se inclui como uma grande ferramenta e popular no meio acadêmico brasileiro e mundial. Sua proposta de complexidade acompanha as mudanças do tempo e consegue entregar produtos de grande valia para pensamentos computacionais em decisão populacional (Douglas-Mankin et al., 2010; Bressiani et al., 2015; Wang et al., 2019). Em tempo, a manipulação do programa demanda saber do operador de conceitos e aplicações do Sensoriamento Remoto, Geoprocessamento e estatística, componentes formadores do pesquisador enquanto estudante, auxiliando na sua formação seja na graduação ou na pós-graduação.

Essa integração saber-aplicação que o SWAT apresenta, como também os produtos que ele entrega direta e indiretamente fez do modelo muito popular no Brasil, sendo utilizado de modo amplo ao longo de quase 30 (trinta) anos. Em diferentes áreas científicas e em diversas regiões, sejam elas macro ou micro, o programa apresentou sua utilidade e fomentou resultados que proviam decisões. Deste modo, a pesquisa em questão tem como objetivo analisar o desenvolvimento temporal do modelo SWAT no Brasil enquanto passado, presente e futuro.

2. Material e Métodos

2.1 Procedimentos Metodológicos

A pesquisa em questão mantém duas metodologias consolidadas nas Ciências Sociais Aplicadas denominadas revisões sistemáticas e bibliométricas. Mesmo havendo semelhanças entre as duas, as propostas são diferentes no que se referem as exposições de informações e busca de produtos chaves para desenvolvimento de uma área temática de interesse. No geral, a pesquisa executa-se sob o prisma sistemático-bibliométrico, qualiquantitativo exploratório.

A pesquisa bibliométrica consiste em um método de investigação científica voltado à análise quantitativa da produção acadêmica e científica sobre determinado tema, área do conhecimento, periódico ou conjunto de autores. Seu objetivo principal é identificar padrões de publicação, tendências de crescimento, evolução histórica de um campo de estudo e relações existentes entre pesquisadores, instituições e países. Por meio desse tipo de pesquisa, torna-se possível compreender como o conhecimento tem sido construído ao longo do tempo, quais são os trabalhos mais influentes e quais temáticas apresentam maior destaque ou emergem como novas oportunidades de investigação (Lakatos; Marconi, 2017).

A revisão sistemática consiste em um método de pesquisa que visa identificar, selecionar, avaliar criticamente e sintetizar, de forma rigorosa e reproduzível, os estudos científicos relevantes sobre uma questão de pesquisa previamente definida. Esse tipo de revisão segue um protocolo explícito, com critérios de inclusão e exclusão bem estabelecidos, estratégias de busca documentadas e procedimentos sistemáticos de análise, com o objetivo de reduzir vieses e garantir maior confiabilidade aos resultados obtidos (Cordeiro et al., 2007; Gil, 2002).

A pesquisa qualitativa é uma abordagem metodológica voltada à compreensão aprofundada de fenômenos sociais, comportamentais ou ambientais, considerando seus significados, contextos e interpretações. Nessa perspectiva, os dados são predominantemente não numéricos e a análise busca compreender padrões, percepções, experiências e relações, sem a pretensão de generalização estatística, mas com foco na profundidade e na complexidade do fenômeno estudado. Já a quantitativa fundamenta-se em métodos numéricos para interpretar os dados obtidos, permitindo descrever comportamentos, comparar grupos, avaliar tendências e verificar associações ou influências entre fatores. (Neves, 1996; Gil, 2002).

A pesquisa exploratória tem como finalidade proporcionar maior familiaridade com um problema ainda pouco estudado ou compreendido, tornando-o mais explícito ou auxiliando na formulação de hipóteses. Caracteriza-se pela flexibilidade metodológica, pelo levantamento inicial de informações e pela busca de referenciais teóricos e empíricos que permitam delinear melhor o objeto de estudo e orientar pesquisas

posteriores mais conclusivas (Gil; Vergara, 2015).

A pesquisa teve como base de busca o Google Acadêmico e SCOPUS. Justifica-se as bases de dados serem estas devido a muitos periódicos brasileiros ainda não estarem indexados nas bases internacionais consolidadas (SCOPUS e *Web of Science*) (justifica-se o Google Acadêmico), ficando de fora os artigos que tiveram a intenção de publicar as relações SWAT (+) no Brasil. O Google Acadêmico por sua vez, entrega a replicabilidade científica necessária para verificação de possíveis vieses de pesquisa como também consegue trazer os documentos de interesse para exposição, uma vez que o sistema indexa as pesquisas brasileiras que não estão no circuito das grandes indexadoras no momento (Mugnaini & Strehl, 2008).

No âmbito bibliométrico, utiliza-se a base SCOPUS para desenvolvimento de informações quantitativas. A SCOPUS é uma das bases científicas mais antigas, sendo respeitada mundialmente. Periódicos que estão vinculados a essa base tem visibilidade internacional e comumente publicam na língua inglesa, isso faz de a pesquisa optar por duas bases para trazer as contribuições de periódicos que podem não se encontrar nessa base específica, mitigando uma limitação na obtenção de dados. Para isso, os critérios estabelecidos para a busca e a coleta de dados na SCOPUS estão visíveis no Quadro 1.

Quadro 1 – Critérios estabelecidos para busca de artigos temáticos - bibliométricos (SCOPUS)

Chart 1 – Criteria established for searching thematic articles – bibliometric (SCOPUS)

Palavras chaves	Anos	Critérios Inclusão	Critérios Exclusão	Base de dados	Artigos encontrados (Quantitativo)	Artigos Coletados (Qualitativo)
(TITLE (soil AND & AND water AND assessment AND tool) OR TITLE-ABS-KEY (swat) AND TITLE-ABS-KEY (brazil)) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar"))	2000 a 2026	Artigos publicados em periódicos	Livros, Monografias, Trabalhos de Conclusão de Curso, Teses, Dissertações e artigos de eventos não considerados.	SCOPUS	166 artigos encontrados (Coletados)	25 artigos (Mais citados) [coletados]

Neste caso, optou-se pelas palavras chaves [“Soil & Water Assessment Tool” ou “SWAT” e “Brazil”] sobre os títulos, resumo e abstract dos artigos indexados nos periódicos vinculados a base. O intervalo temporal foi de 2000 a 2026, e os critérios de limitação foi para apenas artigos, excluindo Livros, Monografias, Trabalhos de Conclusão de Curso, Teses, Dissertações e artigos de eventos, sendo coletado para análise bibliométrica 166 artigos e para análise qualitativa os 25 artigos mais citados.

Os documentos indexados nas grandes plataformas acadêmicas tendem a aparecer também no Google Acadêmico, uma vez que a entrada no GA é umas das primeiras indexações de um periódico; no entanto, há periódicos pesquisados que mantem informações relevantes sobre o tema a ser buscado e não estão nas plataformas mais robustas. O Quadro 2 apresentam as formas e critérios de busca da pesquisa.

Quadro 2 – Critérios estabelecidos para busca de artigos temáticos na revisão sistemática (Google Acadêmico)

Chart 2 – Criteria established for searching thematic articles in the systematic review (Google Scholar)

Palavras chaves	Anos	Critérios Inclusão	Critérios Exclusão	Base de dados	Artigos encontrados	Busca de páginas
"SWAT", "Soil and Water Assessment Tool"	2000 a 2010	Apenas artigos em português, aplicando o SWAT no	Monografias, Trabalhos de Conclusão de Curso, Teses, Dissertações e	Google Acadêmico	12 artigos encontrados	Página 1 a 12 (última página)
	2011 a				50 artigos	Página 1 a

	2020	Brasil; apenas artigos publicados em revistas - periódicos	artigos de eventos não considerados.		encontrados	35
	2021 a 2026				33 artigos encontrados	Página 1 a 34 (última página)
"SWAT+", "Soil and Water Assessment Tool"	2016 a 2026	Apenas artigos em português, aplicando o SWAT+ no Brasil			4 artigos encontrados	Página 1 a 3 (última página)

Ao observar, nota-se uma divisão intencional na busca dos artigos no que corresponde a esfera temporal. Justifica-se o termo “passado” para os artigos brasileiros publicados sobre os anos de 2000 a 2010. O tempo “presente” é justificado pelo intervalo temporal 2011 a 2020, que mesmo não sendo mais presente para o tempo em questão, mediante a “caducagem” (intervalo referente aos últimos 5 anos) acadêmica, esse período foi o mais produtivo em relação ao tema que os outros analisadas.

O termo “futuro” é justificado por duas frentes, a primeira pelo intervalo temporal de 2021 a 2026 e a segunda é sobre o termo “SWAT+”, que se apresenta como a atualização do SWAT que já foi implementada no mundo, mas no Brasil ainda não foi trabalhada quando comparada com o modelo anterior. A escolha do intervalo 2016 a 2026 se dá pela iniciação do programa em termos de publicação, portanto, é o intervalo que abarca toda a série temporal do tema.

As pesquisas foram baixadas, lidas e expostas de modo qualitativo. Mesmo havendo um esforço qualitativo de exaurir os artigos e contemplar todos no documento, é possível que a exposição em profundidade de alguns não seja presente. Tende-se aqui observar os produtos, produções, tendências e limitações do tema sobre o espaço brasileiro. No geral, leu-se como base 123 documentos (98 documentos do Google Acadêmico + 25 do SCOPUS) que tiveram como tema central a aplicação do SWAT no Brasil. Dividiu-se para facilitação discursiva em blocos regionais, dada a multifacetadas características edafoclimáticas nacionais.

2.2 Limitações da pesquisa

Uma das limitações da revisão é a retirada de monografias, Trabalhos de Conclusão de Curso, Dissertações, Teses e artigos publicados em eventos acadêmicos. Entende-se que a retirada de documentos desse tipo reduzirá a aparição de pesquisadores, no entanto, optou-se pela retirada devido a capacidade da revisão por pares e refino do documento quando é submetido em periódico, portanto, pensa-se aqui que as pesquisas defendidas, ora em instituições ora em eventos, foram em momento posterior, submetidas em revistas acadêmicas para servirem de base dados.

Outra limitação dar-se-á pela busca de artigos por páginas, limitando-a a página 35 (trinta e cinco) para a busca de 2011 a 2020; mesmo sendo uma página muito avançada, poderá haver a possibilidade de algum artigo sobre o período temporal não ser abarcado. As outras buscas foram possíveis alcançar todo o intervalo temporal e de páginas sobre o tema.

3. Resultados e Discussão

3.1 O SWAT como elemento histórico

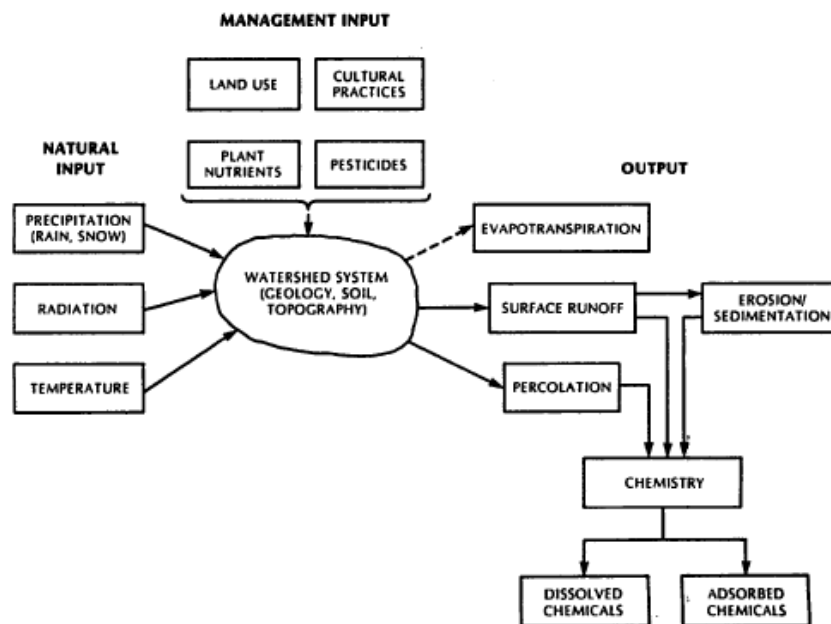
A história do SWAT não é nova e mescla com pensamentos complexos e antigos sobre a hidrologia moderna. Mesmo havendo outros conceitos hidrológicos mais antigos, para o SWAT considera-se um dos primeiros marcos o sistema de coleta de informações de bacias hidrográficas em 1937, no qual, o Serviço de Conservação do Solo (SCS) estabeleceu um programa intensivo de coleta de dados nas bacias experimentais de Riesel (conhecidas como *Blackland Experimental Watershed*), com objetivo de entender o impacto dos processos hidrológicos na erosão do solo e no controle de inundações após as secas devastadoras da década de 1930 sobre a região (Willians et al., 2008).

A partir desse sistema de monitoramento, foram pensados e utilizados outros conceitos que reverberaram no pensamento do SWAT enquanto desenvolvimento. Sherman (1942) foi pioneiro na teoria do hidrograma unitário ao relacionar o escoamento direto com a precipitação. Mockus (1949) expandiu essa visão ao propor métodos para estimar o escoamento em bacias sem medição, integrando variáveis como solo, uso da terra, temperatura e chuvas antecedentes. Andrews (1954) contribuiu com procedimentos gráficos para o "complexo solo-cobertura", permitindo estimar o potencial de retenção a partir da textura do solo e da vegetação. Esses esforços culminaram na metodologia NRCS-CN (*Soil Conservation Service Curve Number*), formalizada em 1954 no manual NEH-4 (Garg et al., 2013).

Ainda sobre o pensamento de modelos integrados, em meados de 1980 desenvolve-se o CREAMS (*Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems*) sendo o primeiro modelo integrado e contínuo desenvolvido para avaliar a poluição de fonte não pontual em escala de campo (Knisel, 1980) (Figura 1).

Figura 1 – Pensamento integrado do CREAMS

Figure 1 – CREAMS integrated thinking



Fonte – (Knisel, 1980) // Source (Knisel, 1980)

Ele combinava três componentes principais que envolviam a hidrologia, erosão/sedimentação e química (nutrientes e pesticidas) (Knisel, 1980). O CREAMS foi estruturado para não exigir calibração para cada aplicação específica, buscando representar fisicamente o sistema através de parâmetros simples e compreensíveis.

Willians et al. (1989) desenvolveram o modelo EPIC (*Erosion-Productivity Impact Calculator*), sendo utilizado inicialmente para quantificar a relação entre a erosão do solo e a produtividade das culturas nos Estados Unidos. Operando em um passo de tempo diário, o modelo era capaz de simular processos por centenas de anos, tornando-se uma ferramenta robusta para prever rendimentos agrícolas sob diferentes condições ambientais e de manejo. Vale ressaltar o programa TR-20 (TR-20 PROGRAM, 1969) que foi adotado para a permissividade de programas de escoamento via canais e estruturas (McCuen, Bondelid, 1983).

Ainda com Willians et al. (1985) apresenta-se o *Simulator for Water Resources in Rural Basins* (SWRRB), pela necessidade de estender as capacidades do CREAMS para grandes bacias rurais complexas. O modelo permitia subdividir a bacia em sub-bacias e adicionava componentes essenciais como um simulador de clima estocástico, fluxo de retorno subterrâneo e armazenamento em reservatórios e lagoas.

Diante a complexidade e inovação promovida pelo modelo CREAMS, em 1987 desenvolve-se o GLEAMS (*Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems*) como evolução direta do modelo de Knisel (1980). O modelo foi pensado para avaliar o impacto das práticas de manejo agrícola no carregamento de produtos químicos para as águas subterrâneas, permitindo simulações de longo prazo para análise de risco (Leonard et al., 1987).

Visando áreas maiores e seu alcance com satisfatoriedade, Arnold (1990) estende as capacidades do SWRRB para bacias muito maiores desenvolvendo o modelo denominado ROTO (*Water and Sediment Routing Model*), visando o transporte e modelagem de vazão e sedimentos, servindo como o elo final para o desenvolvimento do que viria a ser o SWAT. Portanto, pode-se entender que modelos mais antigos como o CREAMS, SWRRB e GLEAMS, bem como os conceitos fundamentais hidrológicos e suas modificações de melhoria serviram para composição em pensamento computacional do SWAT enquanto potencial hidrológico.

Desta forma o SWAT inicia-se enquanto elemento importante para os estudos integrados que envolviam as relações terra-água no circuito de pesquisa. O SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) foi criado no início da década de 1990 através da fusão do SWRRB com o ROTO (Arnold, 1990). Contudo, o modelo não foi estático e veio modificando-se mediante as novas complexidades e demandas que foram solicitadas a ela, a saber o SWAT 94.2 introduziu múltiplas Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs); já o SWAT 96.2 adicionou autofertilização, autoirrigação e impacto de CO₂. A versão SWAT 98.1 aprimorou o degelo e a ciclagem de nutrientes, além de adaptar o modelo para o Hemisfério Sul, sendo um grande passo para pesquisas em países emergentes. A versão SWAT 99.2 incorporou armazenamento em margens e roteamento de metais e o SWAT 2000 incluiu transporte de bactérias (Arnold; Fohrer, 2005; Willian et al., 2008).

Ao passo que o SWAT se modifica, nota-se que outras regiões e países são alcançados. A entrada do hemisfério Sul nos cálculos do modelo faz de países como o Brasil, Índia e China e o continente africano, marcado por problemáticas hídricas por demanda ou por populações extensas terem a possibilidade de criar modelagens que permitam um planejamento territorial voltado as boas práticas em gestão de água.

Uma das facilidades do modelo SWAT vieram da capacidade de integração de novas premissas e pesquisas publicadas em áreas direta ou indiretamente ligadas, mas que fazem força e podem influenciar no modelo, como também ao acesso a manipulação digitalizada das informações geográficas, que auxilia na criação de dados e visualização. A entrada do modelo ALMANAC (*Agricultural Land Management Alternatives with Numerical Assessment Criteria*) que é uma versão especial do modelo EPIC simula a competição entre diferentes espécies de plantas, utilizando funções genéricas para prever o crescimento e o rendimento de culturas, florestas e pastagens, sendo integrado ao SWAT para melhorar a simulação da cobertura vegetal e do uso da água (Kiniry et al., 1996).

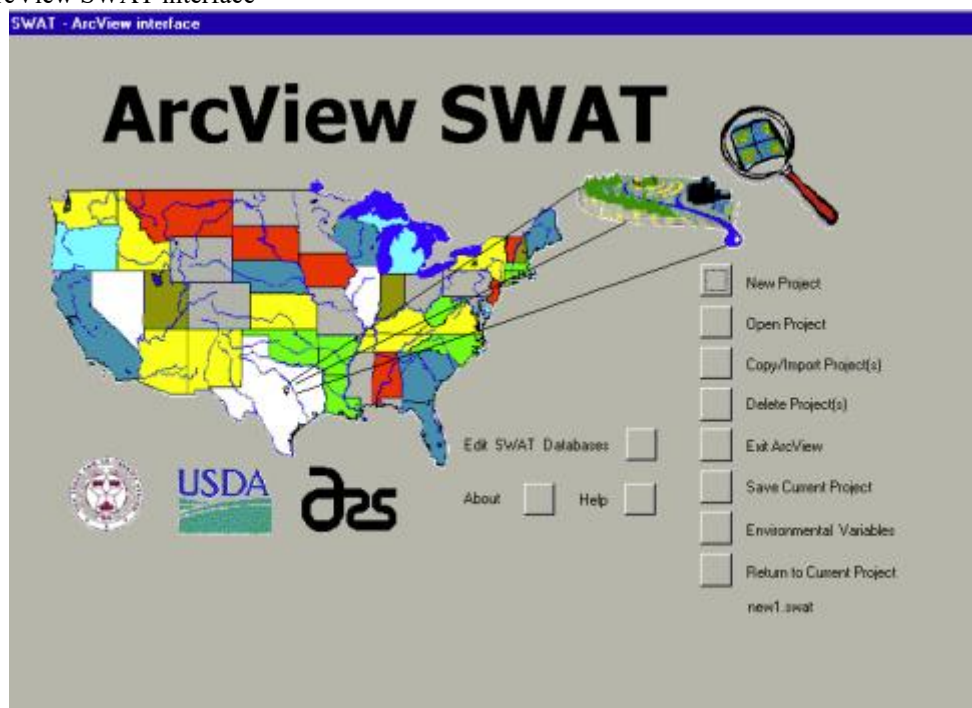
Engel et al (1993) apresenta o SWAT como uma opção de modelo hidrológico e destaca sua integração

com o software GRASS GIS para superar problemas de coleta de dados espaciais (Arnold et al., 1993). Em 1994, Srinivasan e Arnold detalharam a interface que automatizava a extração de parâmetros de solo, uso da terra e topografia a partir de camadas de mapas, reduzindo o tempo de preparação do modelo em várias ordens de magnitude (Srinivasan; Arnold, 1994).

Após a entrada do SWAT em interface GIS *open source*, a busca pela popularização encontra programas clássicos na manipulação de sistemas de informações geográficas, desta forma, observa-se o avanço desenvolvido por Di Luzio et al. (2004) quando lançam o *ArcView* SWAT como uma extensão para o ArcView GIS (ArcGis) que não somente representou um marco na facilidade de uso mas também na popularização do programa, fornecendo uma interface gráfica única para a delineação de bacias, parametrização de entradas e calibração do modelo. Essa ferramenta permitiu que gestores de recursos hídricos controlassem poluições pontuais e não pontuais de forma mais eficiente (Di Luzio et al., 2002a; 2004) (Figura 2).

Figura 2 – ArcView SWAT interface

Figure 2 – ArcView SWAT interface



Fonte: Diluzio et al. 2002b // Source: Diluzio et al. 2002b

O modelo continuou a evoluir com as versões SWAT 2009 e 2012, que trouxeram documentações extensas e ferramentas como o SWAT-CUP para calibração automática (Neitsch et al., 2012; Dile et al., 2016). Em 2016, o SWAT+ foi introduzido como uma reestruturação completa do código, visando maior modularidade e facilidade de manutenção (Bieger et al., 2017). O SWAT+ é mais flexível na representação espacial, introduzindo unidades de paisagem (LSUs) que permitem rotear água e poluentes entre HRUs, melhorando a simulação de planícies de inundação e zonas ripárias. Simultaneamente, a interface QSWAT foi lançada, oferecendo uma alternativa de código aberto baseada em QGIS com recursos aprimorados de visualização (Dile et al., 2016).

Verma et al. (2017) ao revisitar os modelos que tem o escoamento superficial como base de análise, destaca o acoplamento com Sensoriamento Remoto (RS) e GIS como uma forma de modernização da estimativa do escoamento propriamente dito. Mesmo que os métodos originais ou os pensamentos para o

desenvolvimento dos modelos tenham sido desenvolvido antes do uso extensivo de computadores, sua integração com tecnologias geoespaciais permitem agora o processamento de grandes volumes de dados de terreno e vegetação, mantendo o método relevante e eficiente para bacias hidrográficas contemporâneas.

Observando as informações, nota-se que o modelo SWAT ganha força nos Estados Unidos e em outros países, do norte e sul global, pela versatilidade, integração com programas de processamento de dados e visualização como também da capacidade de validação e produção direta de informações tangíveis para desenvolvimento de políticas privadas e públicas que estão relacionadas ao comércio, bem-estar social e populacional ou recipiente agrícola, auxiliando na tomada de decisão em diferentes escalas.

3.2 SWAT no Brasil: passado (2000 – 2010)

Por mais que haja a presença do SWAT em eventos acadêmicos brasileiros, as primeiras abordagens do modelo SWAT no Brasil em periódicos do país iniciaram-se de forma proeminente com os estudos de Machado et al. (2003ab) na microbacia do Ribeirão dos Marins (SP), onde o foco recaiu sobre a simulação do escoamento superficial e da produção de sedimentos utilizando a integração com o SIG ArcView. Em posterior, Garcia et al. (2006) aplicaram o modelo na bacia do Rio Corumbataí (SP) para a modelagem hidrológica e do balanço hídrico, associando-o às equações USLE e MUSLE para predição de erosão e à análise de Superfície de Tendências para avaliar a qualidade da água quanto ao Nitrogênio e Fósforo.

As pesquisas de Brighenti et al. (2016) e Bressiani et al. (2015) apontam a entrada do SWAT no Brasil enquanto aplicação em meados de 1999, apresentando sempre a ferramenta enquanto processo simulatório e não considerando as calibrações necessárias para desenvolvimento pleno dos modelos propriamente ditos. Nestes casos, apontam-se a má qualidade de informações e dados para composição dos projetos naquele período temporal, movimento esse que causou essas problemáticas descritas. Em ambas as pesquisas, considerou-se o quantitativo aproximado de 103 documentos (1999 a 2013) publicados com o SWAT no país, contudo, observa-se que além dos artigos em periódicos, artigos em eventos e principalmente monografias, dissertações e teses foram aderidas para esse quantitativo emergir.

A interface ArcSWAT foi utilizada para analisar a dinâmicas hidrológicas na microbacia do Rio Bonito (SP) para quantificar o aporte de nutrientes (N e P) provenientes de dejetos avícolas, reportando um COE de 0,76 para Nitrogênio e 0,74 para Fósforo, com desvios estatísticos de -2,8% e -2,4% (Neves et al., 2006). No Rio Piraquara (PR), Gonçalves et al. (2007) se voltou a avaliação de cargas difusas urbanas e escoamento superficial, utilizando o coeficiente de determinação R^2 para calibração hidrológica (alcançando 0,83) e analisando parâmetros de qualidade como DBO e OD. No mesmo ano, Xavier et al. (2007) investigaram o efeito da subdivisão da bacia na simulação de sedimentos no Ribeirão dos Marins, tendo um achado interessante, no qual o nível de discretização da bacia pode afetar o resultado final das análises.

Junqueira e Silva (2008) realizaram uma análise metodológica comparativa do SWAT com os métodos de Amorim & Cordeiro E Pesmu, destacando que o modelo SWAT analisa profundamente as características físicas para avaliar o fluxo de água e o transporte de sedimentos, nutrientes e pesticidas, enquanto os outros modelos se voltam a ambientes mais globais ou macros. A aplicação do modelo na bacia do Rio Tijucas (SC) executado por Paim e Menezes (2009) para estimar o balanço sedimentar, utilizando análise de sensibilidade e obtendo, após calibração, um COE de 0,73 e um R^2 de 0,95 em pontos de controle específicos, apresentou resultados satisfatórios frente aos parâmetros de análises de qualidade estatísticos, fomentando a importância de bons dados para composição de pesquisas de múltiplos critérios.

Baltokoski et al. (2010) sob o ArcSWAT analisaram as sub-bacias dos rios Conrado e Pinheiro (PR) para simular a vazão e a exportação de fósforo total, empregando análise de sensibilidade. Por fim, Lelis e Calijuri (2010) realizaram a modelagem hidrossedimentológica na bacia do Ribeirão São Bartolomeu (MG), validando o modelo por meio de parcelas experimentais em campo para identificar zonas de perda de solo e escoamento superficial. Nota-se que os primeiros acessos ao modelo SWAT no Brasil em publicações

periódicas deram-se sobre aspectos de vazão, mas também hidrossedimentológicas, destacando os solos propriamente dito, mas também Nitrogênio, Fosforo e suas comparações com parâmetros de qualidade estipulados por órgãos competentes e outras publicações clássicas.

Entende-se que a timidez em do modelo na primeira década dos anos 2000 no Brasil deu-se pela adaptação do modelo ao hemisfério sul, evitando problemáticas ou aproximações de procedimentos para o alcance de informações frente a realidade. Essa implementação, quando disseminada ao sul global, criou uma nova rede ou um novo núcleo de pesquisa sobre modelagem hidrológica como um todo.

3.3 SWAT no Brasil: passado-presente (2010 – 2020)

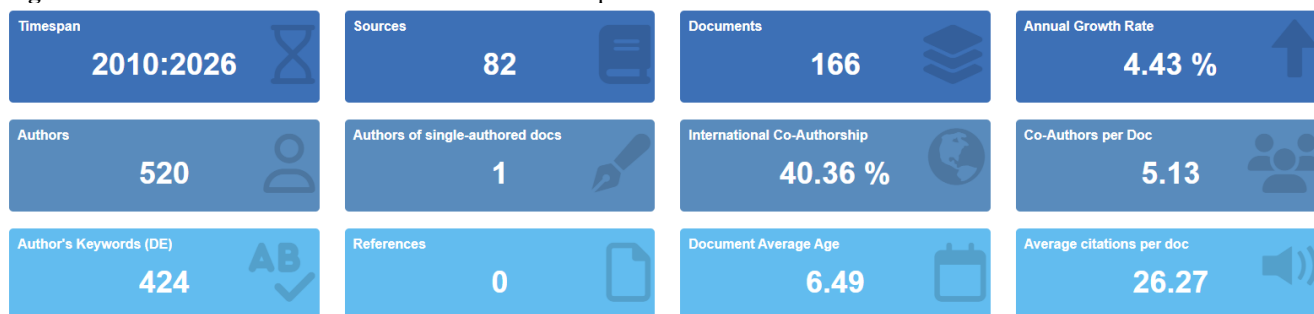
Na segunda década dos anos 2000 observa-se uma presença latentes de pesquisas publicadas em periódicos sobre o SWAT no Brasil. A disseminação dos computadores enquanto elemento de pesquisa, a capacidade de capilaridade das informações mediante a popularização da internet e novos meios de publicação fizeram que o modelo ganhasse força em todas as regiões brasileiras atuando na busca de informações de qualidade para apresentação de decisões consistentes.

Vale ressaltar os eventos acadêmicos, que mesmo não publicizados nessa pesquisa, tiveram grande importância na construção laboratorial das pesquisas e suas exposições iniciais aos pares do mesmo tema. Foi nesses eventos acadêmicos que novas proposições nasceram como aprimoramentos na técnica foram realizadas; os Anais dos Simpósios Brasileiros de Recursos Hídricos como também os próprios eventos realizados pelo SWAT no Brasil fomentaram o modelo no país e o fizeram base para pesquisas de diferentes complexidades e regiões. A pesquisa de Bressiani et al. (2015) apresenta essas informações com uma riqueza de detalhes, onde não somente há uma caracterização do Brasil enquanto elementos edafoclimáticos, mas também a entrega de informações sobre os tratamentos do fazer ciência com o SWAT no Brasil e seus resultados frente a cada pesquisa.

Observando sob a ótica bibliométrica, o país inicia suas publicações em periódicos indexados internacionalmente em 2010 (Figura 3) com crescimento do tema anual de 4%.

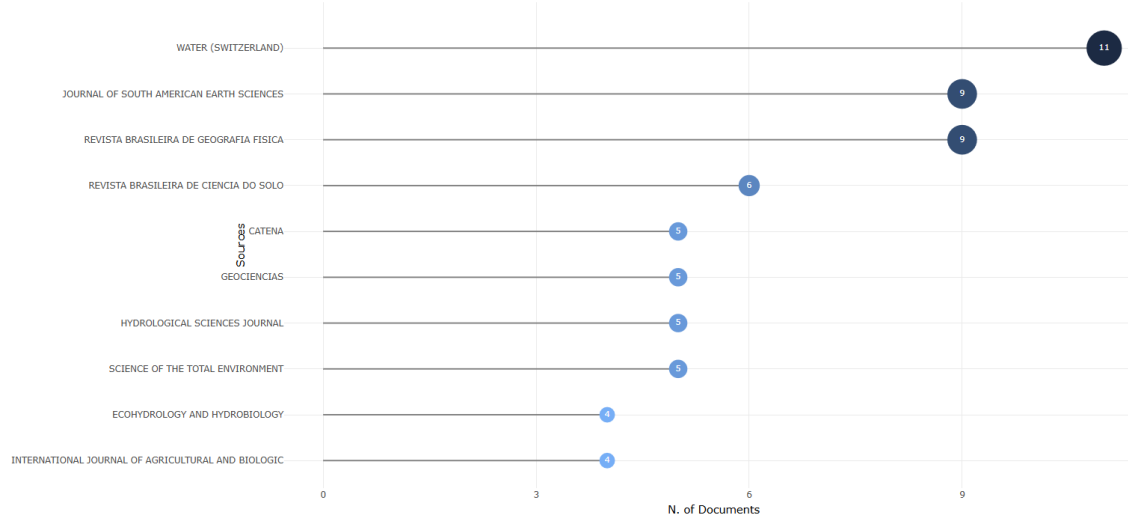
Figura 3 – Informações bibliométricas gerais sobre a atuação do SWAT no Brasil

Figure 3 - General bibliometric information on SWAT performance in Brazil



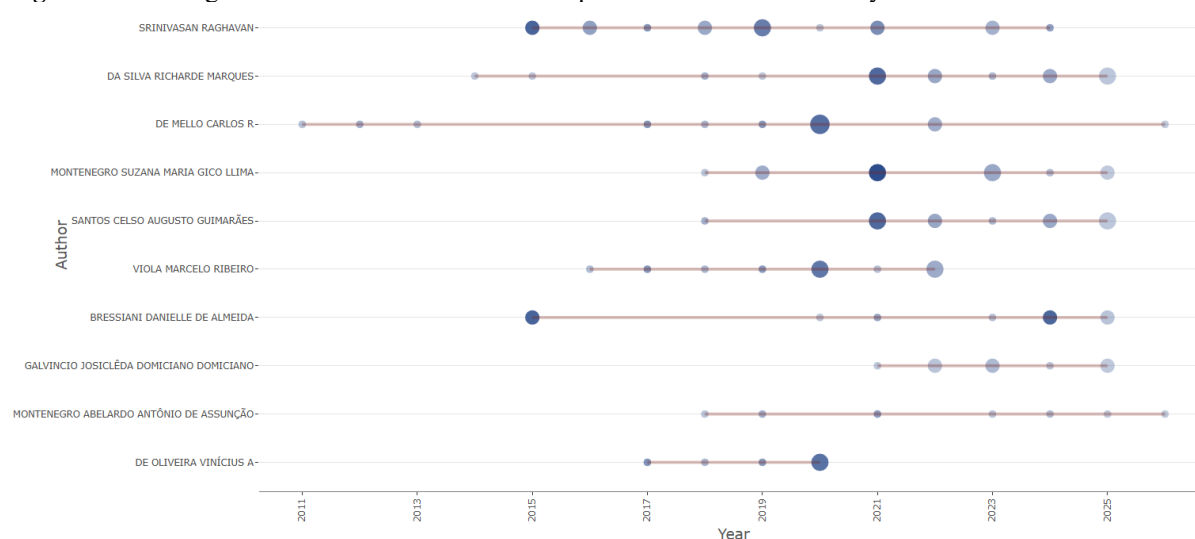
Além da iniciação tardia quando comparado as publicações já observadas em eventos temáticos ou em periódicos não indexados em bases internacionais, observa-se uma coautoria elevada, alcançando 40% como também pesquisas vinculadas a grupos de pesquisas, notado pelo quantitativo de pessoas por artigos publicados. Sobre os veículos de publicação onde o SWAT se destaca, a Figura 4 apresenta os principais periódicos

Figura 4 – Periódicos que mais publicam sobre o tema SWAT no Brasil (SCOPUS)
Figure 4 – Journals that publish most frequently on the topic of SWAT in Brazil (SCOPUS)



Dos dez periódicos observados por quantidade de artigos publicados, apenas três são brasileiros (Revista Brasileira de Geografia Física = 9; Revista Brasileira de Ciência do Solo = 6 e Geociências = 5) com destaque a Revista Brasileira de Geografia Física que integra proximidade com dois periódicos internacionais (*Water [Switzerland]* = 11 e *Journal of South American Earth Sciences* = 9). A presença de periódicos brasileiros não somente é importante para a publicização de ciência bilingue (português e inglês) como também no fortalecimento de locais de leitura no próprio país sobre a ciência. Mesmo que haja o esforço da pesquisa em ser disponibilizada em língua inglesa, os primeiros achados e resultados iniciais marcantes podem ser expostos em periódicos nacionais que trazem impacto para novas pesquisas semelhantes. A Figura 5 aponta sobre a rede de pesquisadores influentes sobre a área no Brasil.

Figura 5 – Principais pesquisadores do SWAT no Brasil e evolução de publicação sobre os anos
Figure 5 – Leading SWAT researchers in Brazil and publication trends over the years

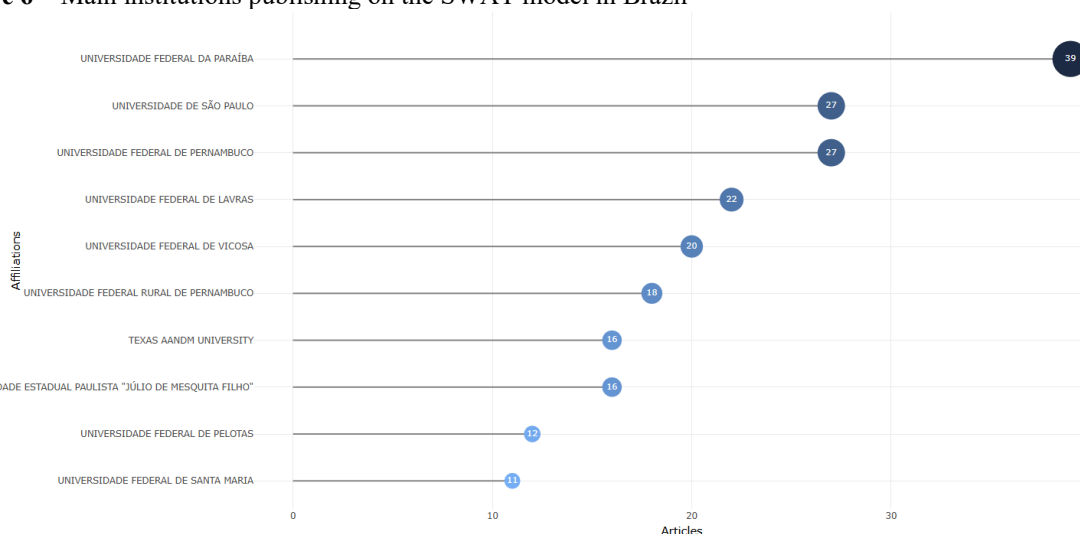


Ao observar a Figura 5, nota-se uma rede de pesquisadores e suas atuações frente as publicações ao longo dos anos. O pesquisador Carlos de Mello possui a maior linha de influência no tema, sendo observada sua atuação de 2011 até os dias atuais; seguido do Pesquisador Richarde Marques, que inicia anos depois na temática. Raghavan Srinivasan, um dos desenvolvedores do SWAT aparecem com frequência nos documentos frente a linha temporal, o que indica a parceria e a influência do pesquisador nos grupos brasileiros e na pesquisa propriamente dita. Entre 2015 a 2017 outros pesquisadores avançam no SWAT no país contribuindo de diversas formas, seja na produção científica, educação e treinamento com o modelo ou organização de eventos e relação entre países; destaca-se as Pesquisadoras Danielle Bressiani, Suzana Montenegro, Josieleida Galvincto e o Pesquisador Abelardo Montenegro.

Além disso, a evolução temporal das publicações permite identificar fases distintas. Entre 2010 e 2015 observa-se um estágio inicial marcado por baixa produção e ocorrência esporádica de estudos, indicando que o tema ainda se encontrava em processo de consolidação. Entre 2015 e 2021 verifica-se um período de expansão, caracterizado pelo aumento acelerado do número de publicações e pela intensificação do interesse acadêmico. Após 2021, a tendência observada e a projeção do modelo indicam redução do ritmo de produção anual, acompanhada pela aproximação da curva cumulativa ao limite superior, sugerindo que o campo passou a apresentar sinais consistentes de maturação e estabilização. A Figura 6 apresenta a institucionalização da pesquisa sobre o tema no Brasil, indicando clusteres regionais latentes.

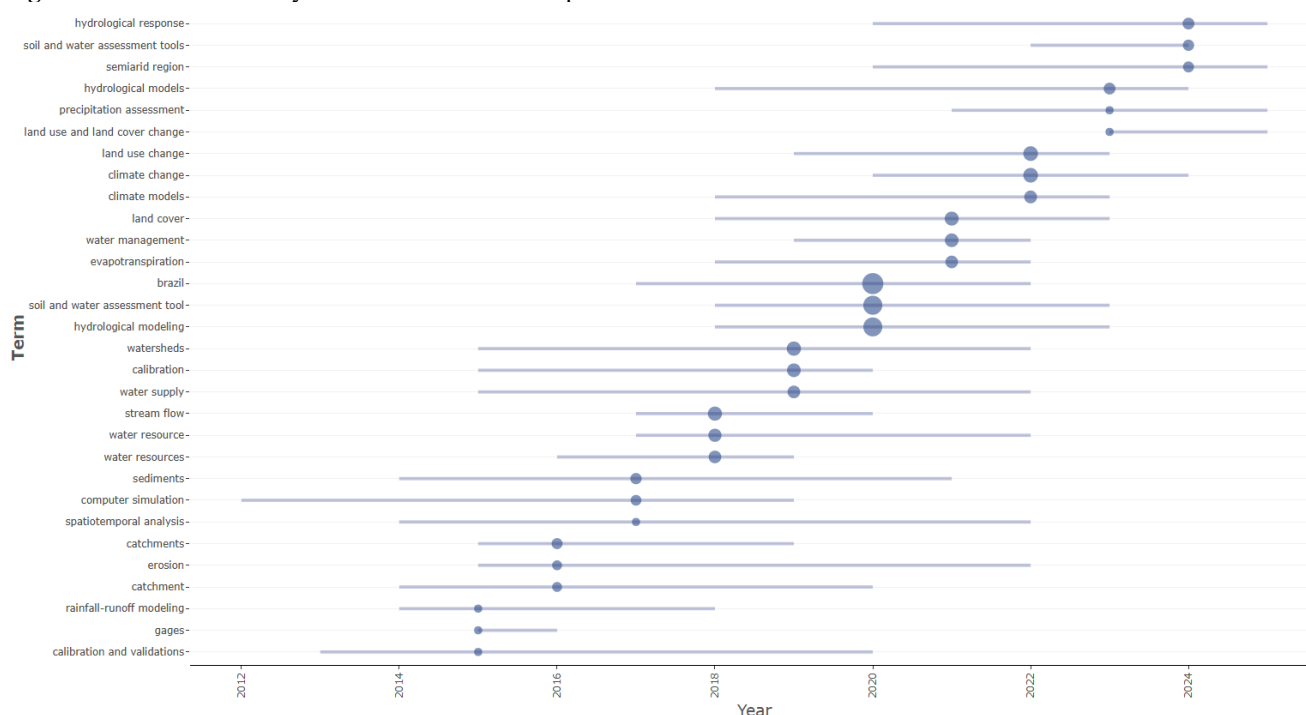
Figura 6 – Principais Instituições que publicam sobre o modelo SWAT no Brasil

Figure 6 – Main institutions publishing on the SWAT model in Brazil



A Universidade Federal da Paraíba em conjunto com a Universidade Federal de Pernambuco se sobressai quando o assunto é publicações sobre o SWAT no Brasil. O cluster Nordeste, quando somada a Universidade Federal Rural de Pernambuco é superior a somatória de todas as universidades (do ranking das 10 universidades que mais publicam sobre o SWAT) das outras regiões do país. Essa informação é demonstrativa que o modelo hidrológico é utilizado em ambientes semiáridos como também para diversas tomadas de decisão. Além do Cluster Nordeste, a região Sudeste mantém instituições de renome (Universidade de São Paulo, Universidade Federal de Lavras, Universidade Federal de Viçosa) que desenvolvem pesquisas com a modelagem para diferentes âmbitos e ambiente, levando em consideração as condições edafoclimáticas locais e as questões sobre recursos hídricos. Na evolução das tendências de tópicos, observa-se resultados importante (Figura 7)

Figura 7 – Evolução das palavras chaves que se relacionam com as publicações do SWAT no Brasil
Figure 7 – Evolution of keywords related to SWAT publications in Brazil

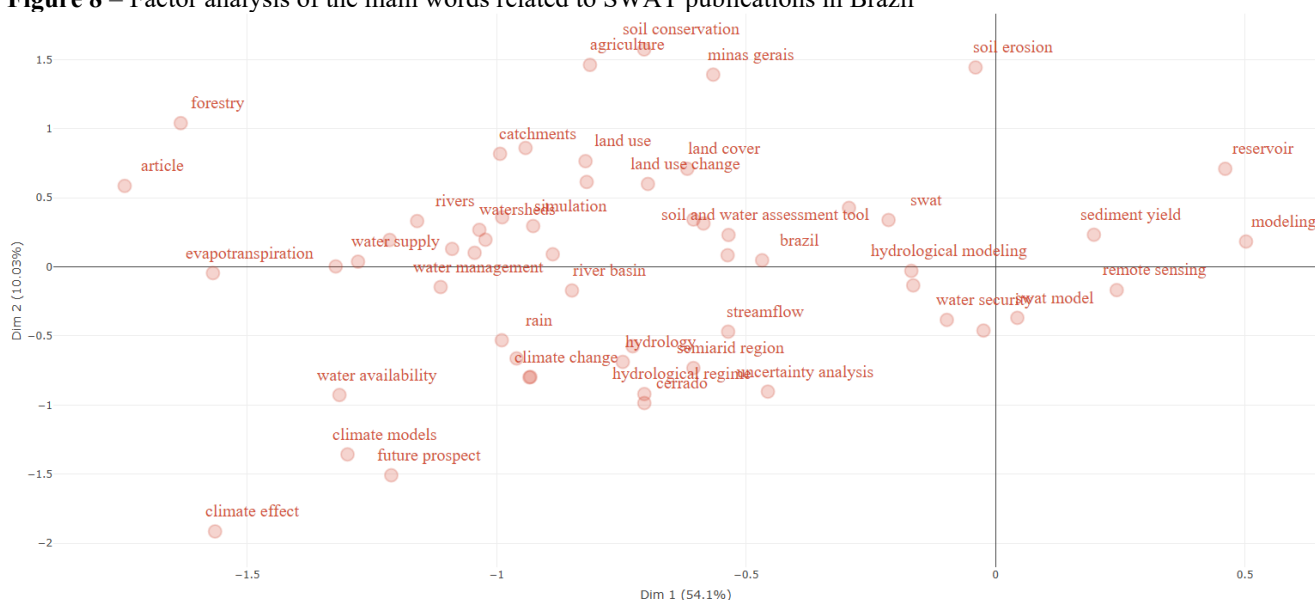


No que se refere ao gráfico de tópicos em tendência, observa-se uma transformação temática progressiva no conjunto de estudos entre 2012 e 2024. Nos primeiros anos, predominam termos associados a metodologias e procedimentos de modelagem hidrológica, com destaque para calibração, validação, simulação computacional e modelagem chuva-vazão. Esse comportamento sugere que, inicialmente, a literatura esteve orientada para o desenvolvimento e aprimoramento de abordagens analíticas voltadas à representação de processos hidrológicos em escala de bacias.

No período intermediário, aproximadamente entre 2017 e 2020, observa-se a ampliação do foco para questões associadas à gestão de recursos hídricos, incluindo termos relacionados à disponibilidade de água, vazão e abastecimento. Nesse intervalo, destacam-se também temas ligados a processos específicos, como evapotranspiração e sedimentos, indicando aprofundamento em componentes particulares do ciclo hidrológico. A presença expressiva do termo “*Brazil*” em torno de 2020 sugere concentração de estudos aplicados ao contexto brasileiro, possivelmente impulsionada por condições ambientais regionais, programas de pesquisa ou demandas institucionais voltadas à gestão de recursos naturais.

Nos anos mais recentes, entre 2021 e 2024, ocorre uma mudança evidente na orientação temática, com aumento da recorrência de termos relacionados às mudanças climáticas, modelos climáticos e transformações no uso e cobertura do solo. Esse movimento indica que a produção científica passou a enfatizar a avaliação de impactos ambientais e a análise integrada de fatores climáticos e territoriais, refletindo a crescente relevância de abordagens que consideram interações entre clima, paisagem e dinâmica hidrológica. A presença de termos como avaliação de precipitação, resposta hidrológica e ferramentas de avaliação solo-água reforça a tendência de utilização de instrumentos analíticos aplicados à compreensão de cenários futuros e riscos ambientais. Os resultados da tendência são auxiliados pela análise fatorial (Figura 8).

Figura 8 – Análise fatorial das principais palavras relacionadas as publicações do SWAT no Brasil
Figure 8 – Factor analysis of the main words related to SWAT publications in Brazil



A análise do mapa fatorial baseado em palavras-chave mescladas, gerado por Análise de Correspondência Múltipla, reforça a existência de uma estrutura temática relativamente bem definida. A primeira dimensão, responsável pela maior parcela da variância, diferencia termos associados à modelagem hidrológica, sensoriamento remoto e análises quantitativas, de outro conjunto relacionado a contextos de uso do solo, manejo ambiental e gestão de recursos hídricos. A segunda dimensão, embora com menor contribuição explicativa, permite observar uma separação entre pesquisas centradas em atividades antrópicas sobre o território, como agricultura e conservação do solo, e estudos mais direcionados à variabilidade climática, disponibilidade hídrica e projeções futuras.

Os agrupamentos observados no mapa indicam a presença de três eixos temáticos predominantes. Um deles está relacionado à interface entre agricultura, conservação do solo e gestão de bacias hidrográficas, com forte associação a recortes regionais brasileiros, como Minas Gerais. Outro eixo evidencia pesquisas orientadas ao uso de ferramentas de modelagem, especialmente o SWAT, combinadas ao sensoriamento remoto, com aplicação voltada à análise de erosão e produção de sedimentos. O terceiro eixo concentra estudos voltados à avaliação de impactos climáticos sobre a hidrologia e a disponibilidade de água, incluindo abordagens de incerteza e foco em regiões vulneráveis como áreas semiáridas e o bioma Cerrado.

Os resultados sugerem que a literatura analisada apresenta forte concentração regional no Brasil, além de uma evolução temática que acompanha o deslocamento da pesquisa hidrológica de abordagens metodológicas iniciais para análises integradas e orientadas a impactos ambientais. A combinação entre modelagem hidrológica, mudanças climáticas e transformações no uso do solo indica um campo voltado à compreensão de riscos e cenários futuros, com aplicação direta em planejamento ambiental e gestão de recursos hídricos. Essas evidências também indicam que a produção científica tende a se estabilizar em termos quantitativos, embora possa continuar se diversificando por meio da especialização temática e da incorporação de abordagens interdisciplinares.

A regionalização das pesquisas é uma das formas de expressar como o SWAT no Brasil se manifestou. O país com um tamanho continental, possui peculiaridades que envolvem carência de dados em alguns locais e abundância em outros; climas equatoriais ao Norte e ao Nordeste clima semiárido; populações concentradas

no litoral e no Sudeste e preservação da floresta amazônica com quase uma ausência populacional frente ao tamanho territorial ao Norte, como também um clima que apresenta semelhança a regiões do norte global no Sul do Brasil. Essas peculiaridades brasileiras fazem da modelagem hidrológica em macro escala um grande desafio, como também mostra os potenciais e dificuldades de cada região frente ao que é do interesse.

A gestão de recursos naturais no Brasil enfrenta desafios significativos devido às taxas excessivas de erosão do solo impulsionadas pelo regime de chuvas, pelas propriedades pedológicas e pela agricultura intensa (Bressiani et al., 2015; Silva et al., 2023). Nesse cenário, o uso do *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) tem se expandido como suporte essencial para a política nacional de recursos hídricos e para a compreensão de sistemas ambientais complexos. As pesquisas acadêmicas predominam, focando na capacidade do modelo em representar adequadamente a variabilidade espacial e temporal das bacias hidrográficas brasileiras. Essas ferramentas mitigam os impactos de eventos hidrológicos extremos, como secas e inundações, permitindo uma gestão mais eficiente da água e do solo (Bressiani et al., 2015).

Na Região Norte, as pesquisas concentram-se em sub-bacias amazônicas como as dos rios Xingu, Tapajós, Machadinho e a bacia Tocantins-Araguaia (Deus et al., 2020; Louzada & Ribeiro, 2019; Correa et al., 2017; Souza et al., 2019). Os parâmetros observados incluem a vazão e a evapotranspiração em resposta ao desmatamento e à expansão da palma de óleo (Silva et al., 2018a; Souza et al., 2019). Um desafio central é a escassez de monitoramento em áreas de difícil acesso e a necessidade de dados climáticos globais de reanálise (Louzada & Ribeiro, 2019; Correa et al., 2017). Os achados de Souza et al. (2019) indicam que a conversão de floresta em pastagem aumenta significativamente a produção de vazão nessas bacias.

Na Amazônia, o monitoramento de bacias como a do rio Itacaiúnas confirmou que quatro décadas de mudanças no uso da terra alteraram significativamente a sazonalidade do fluxo e os rendimentos de sedimentos. A manutenção de áreas protegidas e territórios indígenas na bacia do rio Iriri é apontada como crucial para a estabilidade hidrológica e prevenção de impactos negativos no balanço hídrico (Santos et al., 2018; Serrão et al., 2020). Em grandes bacias como a do rio Tocantins, a utilização de dados de precipitação em grade WFDEI mostrou-se superior para a modelagem de descarga fluvial em comparação com outras fontes de reanálise. Essas contribuições científicas fornecem bases sólidas para estratégias de conservação, permitindo que gestores antecipem os efeitos de intervenções antropogênicas nos ecossistemas de interesse (Monteiro et al., 2016; Serrão et al., 2020).

Para a Região Nordeste, os estudos ocorrem majoritariamente em bacias do semiárido, como o Rio Taperoá, o Rio do Peixe e as bacias de Sumé (Henriques et al., 2017; Nascimento et al., 2018; Silva et al., 2018b). Os parâmetros fundamentais são a produção de sedimentos e o escoamento superficial em rios de regime intermitente tendo desafios para os pesquisadores residindo na alta variabilidade pluviométrica e na pequena espessura dos solos do embasamento cristalino (Dantas et al., 2015; Nascimento et al., 2018). Silva et al. (2018b) demonstram que a vegetação de caatinga é essencial para a proteção do solo contra a erosão hídrica.

Ainda na região, a conversão de pastagens em solo exposto na sub-bacia do Baixo-Médio São Francisco resulta em aumentos críticos na produção de sedimentos (Silva et al., 2018c). Na bacia do rio Tapacurá, situada em zona de ecótono, a combinação de mudanças climáticas e alterações no uso da terra projeta um aumento futuro no escoamento superficial e na erosão. O modelo SWAT tem se mostrado capaz de identificar níveis de degradação da terra e produzir resultados úteis para o planejamento sustentável nessas regiões vulneráveis (Silva et al., 2018c; Santos et al., 2021). A integração de modelos hidrológicos com cenários de uso da terra permite identificar áreas críticas para reflorestamento, por exemplo.

Na Região Sudeste, as pesquisas utilizam o SWAT para avaliar os impactos das mudanças climáticas e do manejo agrícola, especialmente em Minas Gerais e São Paulo (Lelis et al., 2011; Martins et al., 2020). Os parâmetros analisados envolvem a vazão mensal e o balanço hídrico em bacias de cabeceira com predominância de latossolos (Andrade et al. 2013; Lelis et al., 2012). Os desafios encontrados incluem a dificuldade em simular vazões de pico diárias em bacias com solos muito intemperizados (Melo Neto et al.,

2014; Andrade et al. 2013). Segundo Marchioro et al. (2014), o reflorestamento de áreas de preservação reduz drasticamente a concentração de sólidos em suspensão no canal fluvial.

A aplicação do modelo em bacias de clima tropical e solo típico, como a do rio Pomba, revelou que as simulações fornecem estimativas confiáveis para o planejamento hídrico, embora exijam melhorias na representação de chuvas extremas (Pereira et al., 2016). Simulações na bacia do rio Grande alertam para reduções futuras na produção de energia hidrelétrica devido aos impactos das mudanças climáticas no regime de vazões (Oliveira et al., 2017). A restauração florestal ripária em bacias agrícolas de São Paulo, como a do rio Sarapuí, mostrou-se uma estratégia eficaz para a proteção da qualidade da água, reduzindo as cargas de sedimentos e nutrientes (Mello et al., 2017). Uma estrutura de contabilidade de água azul e verde foi aplicada para avaliar a segurança hídrica na bacia do rio Cachoeira, revelando padrões de escassez e vulnerabilidade temporais (Rodrigues et al., 2014; Bressiani et al., 2015). A modelagem na bacia do rio Mucuri demonstrou que o desempenho do simulador varia de acordo com as características de uso e ocupação do solo, exigindo calibrações específicas para diferentes sub-regiões (Almeida et al., 2018).

A Região Centro-Oeste apresenta pesquisas focadas no Distrito Federal, analisando bacias como a do Ribeirão do Gama e do Alto Jardim (Ferreira & Uagoda, 2017; Castro, 2013). Os parâmetros observados são as componentes do balanço hídrico em solos do bioma Cerrado e a recarga de aquíferos (Lima et al. 2014; Ferreira & Uagoda, 2017). Ferreira e Uagoda (2017) apontam que um dos desafios consistem pela incompatibilidade dos parâmetros *default* (base) do modelo com as características tropicais locais, como também apontam que a evapotranspiração é subestimada pelo modelo devido às limitações nas propriedades físicas do banco de dados original.

Nas regiões de bioma Cerrado, as pesquisas destacam o impacto do uso da terra nos processos hidrológicos e a utilidade de produtos de precipitação por satélite em áreas com monitoramento escasso (Silva et al., 2023; Amorim et al., 2020). Na bacia do rio Pípiripau, o uso de conjuntos de dados de precipitação melhorou as previsões de fluxo, enquanto a implementação de terraços e pequenas bacias de retenção reduziu a carga de sedimentos, (Strauch et al., 2012; 2013). Entretanto, a modelagem de vegetação no Cerrado requer modificações para representar adequadamente a dinâmica tropical, que difere das condições de regiões temperadas (Strauch et al., 2013; Bressiani et al., 2015). Pesquisas na bacia do Alto Paranaíba indicam que o modelo é capaz de prever adequadamente tanto o fluxo quanto a carga de sedimentos sob diferentes cenários climáticos. Outros estudos em bacias do Cerrado sugerem que as mudanças climáticas impactarão a frequência de secas e a disponibilidade hídrica regional (Oliveira et al., 2019; Rodrigues et al., 2020).

Na Região Sul, os estudos focam na calibração hidrossedimentológica em bacias com relevos acidentados e uso de reflorestamento de pinus (Blainski et al., 2017a; Zanin et al., 2018). Parâmetros de transporte de sedimentos e vazão em bacias embutidas com reservatórios internos são comumente observados por pesquisadores catarinenses (Blainski et al., 2017b; Zanin et al., 2018). O desafio principal é o curto tempo de concentração das bacias, o que limita a precisão das respostas hidrológicas diárias (Melo Neto et al., 2014; Uzeika et al., 2012). Zanin et al. (2018) indicam que a calibração multi-local é a técnica mais adequada para representar esses sistemas fluviais complexos.

Especificamente no Rio Grande do Sul, pesquisas demonstram que práticas de manejo conservacionista são fundamentais para reduzir a perda de solo e otimizar o balanço hídrico em bacias dominadas pela produção de grãos e laticínios (Silva et al., 2023). A aplicação de modelos hidrológicos em bacias de pequeno porte nessa região comprovou a adequação do SWAT para representar o comportamento de vazões e a curva de permanência, auxiliando na gestão de outorgas. O uso de modelos adaptados, como o SWAT-landscape, permitiu simular com maior precisão a capacidade de transporte de sedimentos em bacias de encostas íngremes, evidenciando a necessidade de ajustes estruturais nos códigos para capturar fenômenos de deposição (Bonumá et al., 2014; Bressiani, 2015). Estudos na bacia do rio Iguaçu indicam que a calibração multivariável, integrando dados de evapotranspiração por sensoriamento remoto, melhora a incerteza das previsões de fluxo em comparação com calibrações de local único. Além disso, a importância da resolução espacial dos dados foi

comprovada na bacia do rio Camboriú, onde imagens de alta resolução evitam custos desnecessários em medidas de controle de sedimentos (Franco et al., 2020; Fisher et al., 2018).

As pesquisas realizadas em bacias brasileiras indicam que os parâmetros do SWAT mais sensíveis aos solos tropicais são aqueles relacionados às propriedades físicas do solo, ao manejo da cobertura vegetal e ao fluxo de água subterrânea (Arroio Júnior; Mauad, 2015; Castro; Machado, 2019). Segundo Ferreira e Uagoda (2017), uma das principais dificuldades do modelo em solos tropicais deve-se ao fato de seu banco de dados original ser voltado para características de zonas temperadas, o que pode gerar inconsistências em biomas como o Cerrado. Dentre os parâmetros de maior sensibilidade para os sedimentos, observa-se no Quadro 3.

Quadro 3 – principais parâmetros de calibração utilizados nas pesquisas brasileiras

Chart 3 – Main calibration parameters used in Brazilian research

CN2 (Número da Curva)	É frequentemente o parâmetro mais sensível, pois correlaciona o uso do solo, o tipo hidrológico e as condições de umidade para estimar o escoamento superficial.
SOL_AWC (Capacidade de Água Disponível)	Este parâmetro define a capacidade do solo de armazenar e liberar água para as plantas, influenciando diretamente o balanço hídrico e o fluxo de base.
SOL_K (Condutividade Hidráulica Saturada)	Representa a facilidade com que o solo transmite água; ajustes neste parâmetro têm relação direta com a resposta da vazão e a redução do escoamento superficial.
SOL_Z (Profundidade do Solo)	Parâmetro fundamental que define a espessura das camadas e influencia a redistribuição e evaporação da água no perfil pedológico.
ESCO (Fator de Compensação de Evaporação do Solo)	Ele corrige deficiências conceituais do modelo original para que a demanda evaporativa das camadas inferiores do solo seja melhor representada, sendo altamente sensível em bacias brasileiras.
ALPHA_BF (Constante de Recessão do Fluxo de Base)	Relaciona-se ao tempo necessário para que o fluxo subterrâneo atinja o canal, sendo essencial para a calibração de vazões mínimas em bacias com forte influência de aquíferos.

Conforme apontam Melo Neto et al. (2014), uma limitação importante do modelo é que ele não permite a inserção de dados de atributos físicos do solo (como SOL_AWC e SOL_K) de forma espacialmente distribuída via mapas, tratando-os apenas por valores médios por tipo de solo, o que afeta a precisão da simulação do balanço hídrico em microbacias tropicais (Arroio Júnior ; Mauad, 2015; Castro, 2014). Além disso, solos como os Latossolos representam um desafio específico por serem argilosos, o modelo tende a assumir baixa infiltração, ignorando sua estrutura altamente porosa e permeável, o que exige ajustes manuais rigorosos para evitar a superestimativa do escoamento superficial.

Para vazão ou escoamento superficial, diversas pesquisas indicam que o parâmetro CN2 (Número da Curva) é frequentemente o mais sensível por estar diretamente relacionado ao uso do solo, tipo pedológico e condições de umidade antecedente (Castro; Machado, 2019; Ferreira e Uagoda, 2017; Martins et al., 2020).

Os parâmetros que descrevem as propriedades físicas do solo como a profundidade da camada (SOL_Z) e a capacidade de água disponível (SOL_AWC) também apresentam elevada significância na predição da vazão (Martins et al., 2020; Andrade et al. 2013). No que tange à simulação do fluxo subterrâneo e escoamento de base destacam-se como sensíveis a constante de recessão (ALPHA_BF), o tempo de retardo da água subterrânea (GW_DELAY) e o limiar de profundidade para o fluxo de retorno (GWQMN) (Aragão et al., 2013; Pereira et al., 2014; Andrade et al. 2013).

O controle dos picos de cheia e do tempo de concentração é influenciado pelo coeficiente de retardo do escoamento superficial (SURLAG) e pelo coeficiente de rugosidade de Manning para o canal principal (CH_N2) (Pereira et al., 2014; Andrade et al. 2013; Lelis et al., 2012). Adicionalmente os processos de perda de água para a atmosfera são governados pelo fator de compensação da evaporação do solo (ESCO), pelo armazenamento máximo no dossel (CANMX) e pelo fator de compensação de absorção pelas plantas (EPCO) (Paz et al. 2018; Alvarenga et al., 2020).

Sabe-se que a sensibilidade desses parâmetros varia conforme a escala espacial da bacia, as características do bioma e a distribuição temporal da precipitação. Em solos tropicais muito intemperizados como os latossolos é comum a necessidade de reduzir o valor inicial de CN2 durante a calibração para representar adequadamente as altas taxas de infiltração reais (Correia et al., 2017; Correia, 2018).

Outro parâmetro importante e utilizado em totalidade nas pesquisas quem envolvem o SWAT no Brasil diz respeito aos intervalos de satisfatoriedade dos dados-produtos. A pesquisa de Moriasi et al. (2007) apresenta a relação performance de modelo para vazão (Tabela 1).

Tabela 1 - Performance do modelo para vazão a partir de estatísticas recomendadas por Moriasi et al. (2007) para dados mensais de vazão.

Table 1 - Model performance for flow based on statistics recommended by Moriasi et al. (2007) for monthly flow data.

Performance	NSE	PBIAS	RSR
Muito boa	1 – 0,75	PBIAS < ± 10	0,0 – 0,50
Boa	0,75 – 0,65	±10 ≤ PBIAS < ± 15	0,50 – 0,60
Satisfatória	0,65 – 0,50	±15 ≤ PBIAS < ± 25	0,60-0,70
Insatisfatória	≤ 0,50	PBIAS ≥ 25	> 0,70

Fonte: Moriasi et al. (2007) // Source: Moriasi et al. (2007)

Essa informação entrega para a pesquisa brasileira parâmetros internacionais replicáveis e justificáveis para modelagens que mantém sob cenários problemáticas de ausência de dados ou dados incompletos, bacias hidrográficas com inconsistências antrópicas ou novas propostas ainda não implementadas, como por exemplo as transposições. Neste caso extremo de dificuldades em manter o modelo produzindo bons resultados por consequência dos dados, a busca de performances “satisfatórias” pode ser realizada via NSE (*Nash–Sutcliffe model efficiency coefficient*), PBIAS ou RSR (*Root Mean Square Error Ratio*).

A revisão geral da literatura brasileira sobre o tema indica que, apesar do crescimento acadêmico, ainda há lacunas na acessibilidade a dados de entrada de alta qualidade e na adoção dessas ferramentas por instituições governamentais (Bressiani et al., 2015). A maior concentração de estudos SWAT ocorre nas regiões Sul e Sudeste, evidenciando a necessidade de expandir as aplicações para sistemas de grandes bacias no Norte e Centro-Oeste. A maioria das investigações foca em vazão e sedimentos, com poucos estudos abordando transporte de nutrientes e pesticidas. Apesar dessas limitações, a adaptação do SWAT às diversas condições ambientais e climáticas brasileiras é promissora para o suporte à decisão na gestão de bacias hidrográficas.

No entanto, diversas pesquisas realizadas por instituições internacionais e em colaboração com pesquisadores brasileiros têm integrado bacias hidrográficas do Brasil em estudos comparativos de escala global ou multirregional. Um exemplo central nesse âmbito é a análise comparativa dos impactos das mudanças climáticas no escoamento fluvial que incluiu a bacia do rio Grande, no Brasil, juntamente com bacias localizadas no Canadá, Sudeste Asiático, Sudoeste da África, China e Reino Unido. Sob esse âmbito de observação, constatou-se que a incerteza estrutural proveniente dos modelos climáticos globais é significativamente superior à incerteza associada ao tipo de modelo hidrológico utilizado, seja ele de escala global ou de escala de bacia (Gosling et al., 2011; Oliveira et al., 2017).

Essas divergências ressaltam a complexidade da tomada de decisão baseada em modelos únicos e a importância da utilização de conjuntos de modelos para capturar a variabilidade das projeções. A cooperação científica internacional também tem se voltado para o aprimoramento técnico de ferramentas de simulação aplicadas ao ambiente brasileiro, como a adaptação de modelos para representar o transporte de sedimentos em encostas íngremes no Rio Grande do Sul em parceria com laboratórios dos Estados Unidos e da Alemanha. Outra linha de pesquisa envolve a avaliação da acurácia de produtos de precipitação em grade de alcance global, demonstrando que dados como o WFDEI apresentam representações precisas da precipitação em território brasileiro, sendo superiores a outras fontes de reanálise para fins de modelagem hidrológica em grandes bacias (Bonumá et al., 2014; Monteiro et al., 2016; Gosling et al., 2011).

As pesquisas de âmbito internacional frequentemente posicionam os biomas brasileiros, especialmente a Amazônia e o Cerrado, como áreas de interesse crítico devido ao seu papel nos fluxos globais de energia e água. Nesse contexto, o Brasil é frequentemente comparado a outras regiões de agricultura intensa na América do Sul, Sudeste Asiático e África Subsaariana, sendo identificado como um país onde os efeitos da erosão do solo são severos, mas também como pioneiro na adoção de práticas de conservação. Essas investigações globais contribuem para validar a robustez de modelos como o SWAT em diversas condições edafoclimáticas, permitindo comparações diretas com bacias na Espanha, Paquistão, Marrocos e África Oriental (Serrão et al., 2021; Amorim et al., 2020; Silva et al., 2025).

3.4 SWAT no Brasil: presente-futuro (2020 – 2025)

As pesquisas utilizando o modelo hidrológico SWAT no Brasil iniciaram sua expansão na década de noventa e apresentaram um aumento expressivo a partir do ano de dois mil e nove (Vergara et al., 2021; Almeida et al., 2023). Bressiani et al. (2015) destacam que essa ferramenta se tornou popular devido à sua robustez na simulação dos impactos das mudanças no uso do solo sobre os recursos hídricos.

Na região Norte as aplicações do modelo SWAT são proporcionalmente menores quando comparadas às outras áreas brasileiras em decorrência da vasta extensão territorial e menor densidade de monitoramento. Contudo, as aplicações na região demonstraram que o modelo consegue reproduzir adequadamente a vazão em bacias amazônicas altamente preservadas (Rufino et al., 2024).

Rufino et al. (2024) apontam que parâmetros associados aos fluxos subterrâneos e à infiltração são os mais sensíveis nessa região amazônica. Os principais achados indicam que o SWAT é uma ferramenta valiosa para a gestão hídrica em bacias florestadas mesmo com a baixa disponibilidade de estações de medição.

No Nordeste as pesquisas focam no semiárido para auxiliar no planejamento hídrico diante da escassez e da grande irregularidade das chuvas (Chagas et al., 2022; Farias et al., 2023). Chagas et al. (2022) observaram que o modelo simula com eficiência a umidade do solo e representa bem os efeitos das mudanças de cobertura vegetal na bacia do Riacho Jatobá. Os achados nesta região indicam que solos argilosos com cobertura de pastagem apresentam os maiores estoques hídricos médios anuais. Um desafio recorrente é a alta taxa de evapotranspiração real que consome a maior parte da precipitação e limita a disponibilidade superficial de água (Soares et al., 2024; Tiburcio et al., 2024).

Ainda no Nordeste, foi identificado que a evapotranspiração real e a percolação consomem a maior parte da água precipitada no semiárido. Os achados de Chagas et al. (2022) revelaram que solos argilosos sob cobertura de pastagem mantêm estoques hídricos anuais superiores aos solos rasos com vegetação de Caatinga. De acordo com Nunes et al. (2022), as variações nas condições de uso do solo alteram significativamente o comportamento do escoamento superficial e os processos erosivos.

Um dos principais desafios citados na literatura regional é a insuficiência de bases de dados confiáveis e estações de monitoramento fluviométrico. A irregularidade pluviométrica interanual dificulta a calibração do modelo, especialmente em bacias sem dados de vazão e sedimentos (Paz et al., 2022ab). Além disso, a alta taxa de evapotranspiração potencial, que pode superar mil e seiscentos milímetros anuais, impõe dificuldades

técnicas na representação do balanço hídrico real (Nunes et al., 2022; Cunha; Pereira, 2025; Soares et al., 2024; Tibúrcio et al., 2024).

Pesquisas recentes focadas em mudanças climáticas projetam agravamentos na disponibilidade hídrica futura do Nordeste. Tibúrcio et al. (2024) apontam que a partir de dois mil e quarenta e um a bacia do rio Moxotó poderá apresentar uma taxa de evapotranspiração real de oitenta e sete por cento. Tais cenários elevam a vulnerabilidade socioeconômica da população sertaneja diante do aumento da frequência de secas extremas (Oliveira et al., 2024).

As pesquisas também avançaram na caracterização morfométrica das bacias hidrográficas utilizando as ferramentas integradas ao SWAT (Almeida et al., 2022). Silva e Farias (2021) observaram que bacias com formatos mais alongados contribuem para o processo de escoamento e são menos propensas a enchentes repentinas. A modelagem de sedimentos, embora limitada pela falta de monitoramento contínuo em campo, permite identificar áreas críticas que necessitam de intervenções conservacionistas prioritárias (Jovino et al., 2022; Paz et al., 2022ab).

Na região Sudeste os estudos abordam com frequência os impactos das mudanças climáticas e da urbanização sobre as vazões e a produção de sedimentos (Passos et al., 2021; Carvalho et al., 2021). Martins et al. (2021) constataram que a recuperação da vegetação ripária em faixas de trinta metros reduz a produção de sedimentos em trinta por cento. A pesquisa de Passos et al. (2021) revelam que o manejo agrícola e o reflorestamento são mais eficientes que a simples recuperação de margens de rios. Os desafios incluem a necessidade de calibração precisa para representar vazões máximas em bacias de pequena escala sujeitas a inundações frequentes. De acordo com Jovino et al. (2022), estudos realizados no Ribeirão do Feijão em São Paulo identificaram que os Latossolos favorecem a infiltração embora a expansão urbana pressione mananciais estratégicos. Esses trabalhos evidenciam a necessidade de planejar o uso do solo para proteger a funcionalidade dos ecossistemas locais.

A utilização de dados meteorológicos de reanálise surge como uma solução recorrente para a falta de séries históricas completas. Alves et al. (2021) demonstraram que tais dados são adequados para simulações hidrológicas em Limeira permitindo mitigar falhas em estações convencionais. Contudo verificou-se que essa fonte alternativa pode superestimar as vazões de pico em comparação aos dados medidos em campo.

Em Minas Gerais a modelagem ecohidrológica aborda grandes bacias complexas com variados usos e formas de relevo. Almeida et al. (2023) customizaram o SWAT para o Rio das Velhas utilizando a calibração em múltiplos locais para representar a heterogeneidade tropical. Os achados revelam que o aumento da intensidade do uso da terra eleva o escoamento superficial e reduz o fluxo de base significativamente.

A segurança hídrica para o abastecimento público também é foco de investigações em tributários do Rio Paraíba. Pires et al. (2022) utilizaram o modelo para avaliar as taxas de recarga natural subterrânea na região de Juiz de Fora. Os resultados concluíram que o latossolo é aproximadamente trinta por cento mais eficiente na condução hídrica para o aquífero que o cambissolo. Na região serrana do Rio de Janeiro as pesquisas recentes utilizam cenários climáticos futuros para projetar vazões entre os anos de dois mil e trinta e dois mil e sessenta. Passos et al. (2025) identificaram por meio do teste de Mann Kendall que as vazões em períodos secos tendem a diminuir conforme as projeções. Esse panorama sugere uma intensificação das secas e exige uma gestão hídrica adaptativa no município.

Estudos sobre a retenção de sedimentos avaliam a eficácia das áreas de preservação permanente conforme a legislação florestal brasileira. Martins et al. (2021) constataram que a recuperação de faixas de trinta metros de largura reduz a produção de sedimentos em trinta por cento. Entretanto o manejo agrícola adequado em toda a subbacia mostrou-se mais eficiente na diminuição do escoamento do que a simples recuperação marginal (Passos et al., 2021).

Os desafios enfrentados incluem a dificuldade técnica de simular fluxos de base e vazões mínimas de forma precisa em terrenos montanhosos. Nogueira et al. (2024) ressaltam que a resolução grosseira de mapas de solo e a carência de monitoramento constante geram incertezas nas simulações. A falta de dados contínuos

de sedimentos impossibilita calibrações robustas para a fase sólida do ciclo hidrológico regional (Oliveira et al., 2024; Paz et al., 2022a).

No Centro Oeste as investigações se concentram no bioma Cerrado e na avaliação da segurança hídrica para o abastecimento público (Cunha; Pereira, 2025; Alves et al., 2022). Alves et al. (2022) identificaram que o parâmetro de intervalo de tempo para a recarga do aquífero é um dos mais sensíveis para a calibração do modelo. Um desafio técnico significativo nesta região é a necessidade de ajustar o código fonte do modelo para desativar a dormência da vegetação. Como o SWAT foi desenvolvido para zonas temperadas, ele subestima a evapotranspiração no Cerrado ao assumir que as plantas perdem folhas no inverno tropical.

Na região Sul as pesquisas exploram as transformações do Bioma Pampa e os riscos ambientais causados pela suinocultura intensiva. Conceição (2025) utilizou a modelagem para identificar zonas críticas onde a declividade elevada e a densidade animal aumentam a poluição difusa por fósforo. Trentin et al. (2023) concluíram que a substituição de campos nativos por lavouras de soja e arroz provoca um aumento considerável na evapotranspiração. Os desafios observados residem na adaptação do banco de dados do modelo às características específicas de solos e culturas brasileiras (Trentin et al., 2021).

Um dos maiores desafios para o Brasil encontra-se na região do Nordeste onde o clima Semiárido é predominante. A simulação do balanço hídrico no semiárido nordestino enfrenta o desafio primário da escassez e alta irregularidade das chuvas, que apresentam grande variabilidade interanual e espacial (Chagas et al., 2022; Nunes et al., 2022; Lins et al., 2021). Essa intermitência pluviométrica resulta em bacias onde a maioria dos rios são intermitentes, com longos períodos de vazão nula, dificultando a calibração de modelos hidrológicos. Outro obstáculo significativo é a insuficiência de bases de dados confiáveis e estações de monitoramento fluviométrico e climatológico com séries consistentes na região (Nunes et al., 2022; Cunha; Pereira, 2025; Paz et al., 2022a)

No entanto, a modelagem hidrológica no Brasil enfrenta limitações severas relacionadas à quantidade, qualidade e resolução dos dados de entrada. As principais dificuldades residem na insuficiência de bases de dados confiáveis, que muitas vezes são inexistentes ou apresentam séries históricas curtas, o que gera incertezas significativas nos processos de calibração e validação (Vergara et al., 2021; Cunha; Pereira, 2025).

Outros pontos envolvem a busca de variáveis climáticas fundamentais, como radiação solar, umidade relativa do ar e velocidade do vento, são comumente não medidas pelas estações de campo, forçando o uso de geradores climáticos sintéticos ou dados de reanálise, que possuem incertezas inerentes. A medição direta da evapotranspiração real também é citada como onerosa e difícil. Portanto, busca-se sempre dados de reanálise ou globais em detrimento de dados reais da região (Alves et al., 2021; Lins et al., 2021).

Vale ressaltar que os dados necessários estão frequentemente espalhados em diversas fontes institucionais e em formatos que não são diretamente utilizáveis pelos softwares de modelagem, exigindo um esforço considerável de pré-processamento (Vergara et al., 2021; Silva; Farias, 2021; Alves et al., 2022). Não há uma ambientação de órgãos competentes, mesmo havendo uma série de pesquisas que apontam a modelagem (não somente o SWAT) como forma de análise terrestre, que adequa os dados a modelos clássicos e utilizáveis no Brasil. Isso faz da pesquisa científica e do pesquisador um desgaste em tempo só para preparação de informações iniciais como também a busca das mesmas. Para mitigar essas lacunas, o uso de dados de reanálise e ferramentas de sensoriamento remoto podem ser uma opção, contudo essas alternativas ainda podem elevar os erros de superestimativa ou subestimativa em relação aos dados medidos em campo uma vez que não são dados reais (Alves et al., 2021; Lins et al., 2021; Monteiro et al., 2015).

Especificamente em Pernambuco, há a existência do Sistema de Unidades de Resposta Hidrológica para Pernambuco (SUPer) que atua como uma plataforma interativa de modelagem hidrológica essencial para a gestão dos recursos hídricos no semiárido (Rodrigues Júnior et al., 2023; Soares et al., 2024). Desenvolvido por meio de uma parceria entre universidades brasileiras (UFPE, UFRPE, UFCG), o ITEP e a Texas A&M University, o sistema utiliza o modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) como seu mecanismo principal de simulação. O papel primordial do SUPer é fornecer suporte técnico-científico às decisões políticas,

econômicas e sociais do estado de Pernambuco, permitindo monitorar e planejar o uso sustentável da água e do solo (Silva et al., 2021; Soares et al., 2024; Tiburcio et al., 2024; Silva et al., 2025).

A plataforma disponibiliza modelos pré-calibrados para as 13 grandes bacias hidrográficas de Pernambuco. Um diferencial significativo do SUPer é a oferta de séries históricas extensas (desde 1961) com dados diários e mensais, o que possibilita estudos consistentes de longo prazo sobre o comportamento hidrológico regional. Através de sua interface web intuitiva, os usuários podem simular e acessar dados de variáveis críticas como precipitação, evapotranspiração, escoamento superficial e transporte de sedimentos, além de ciclos de nutrientes como nitrogênio e fósforo (Silva et al., 2021; Soares et al., 2024; Tiburcio et al., 2024).

Ao centralizar e processar dados complexos em nuvem, o sistema democratiza o acesso a ferramentas avançadas de modelagem, auxiliando na condução de políticas de planejamento ambiental e territorial. Pode ser considerado um avanço inovativo ao SWAT e sua modelagem para o Brasil. No entanto, o SWAT também se remodela enquanto escala global, uma vez que novas demandas emergiram, programas clássicos de GIS optaram pelo uso da nuvem, equações para implementações foram instauradas e questionamentos sobre a calibração, um movimento de grande essencialidade no SWAT ter limitações financeiras enquanto ao uso; desta forma, o SWAT+ (ou o SWAT Plus) entra no escopo, sendo considerada nesta pesquisa o futuro do modelo.

3.5 SWAT no Brasil: futuro (SWAT+)

O modelo SWAT+ consiste em uma versão reestruturada do *Soil and Water Assessment Tool* que foi desenvolvida para enfrentar os desafios da modelagem e gestão de recursos hídricos. Esta ferramenta é amplamente empregada ao redor do mundo para a quantificação e a espacialização de processos hidrológicos em bacias hidrográficas atuando como um valioso suporte para o planejamento ambiental e para metodologias fundamentadas na geoecologia das paisagens (Campos et al., 2024).

A principal inovação desta versão reside na introdução do conceito de unidades de paisagem o qual oferece uma heterogeneidade espacial aprimorada ao diferenciar as partes elevadas do relevo das zonas ripárias conhecidas como *floodplains*. Essa capacidade de representação detalhada permite uma avaliação das relações complexas entre os elementos da paisagem proporcionando análises mais assertivas para a gestão territorial. No âmbito do planejamento ambiental o modelo permite a simulação e a comparação de cenários base com cenários alternativos para prever os impactos de mudanças no uso da terra ou de intervenções de manejo na disponibilidade hídrica e na produção de sedimentos (Nogueira et al., 2024; Campos et al., 2024).

O SWAT+ utiliza ainda a Equação Modificada de Perda de Solo para calcular a dinâmica de erosão e transporte de sedimentos o que auxilia na identificação de trechos críticos que devem ser priorizados em projetos de recuperação. Consequentemente o SWAT+ se consolida como um instrumento fundamental para promover o uso racional dos recursos naturais e a conservação da biodiversidade em bacias hidrográficas (Campos et al., 2024).

Os trabalhos analisados aplicaram o modelo hidrológico SWAT+ em diferentes contextos geográficos para subsidiar o planejamento ambiental e a gestão de recursos hídricos em bacias hidrográficas brasileiras. Campos et al. (2024) demonstrou a utilidade da ferramenta no planejamento geoecológico da bacia de Rio Bonito no Espírito Santo ao evidenciar que a simulação de práticas conservacionistas como a construção de terraços permite prever reduções de até vinte e três por cento no escoamento superficial e o aumento da infiltração de água no solo.

De forma complementar Nogueira et al. (2024) investigaram a influência das zonas ripárias na bacia do córrego Capão Comprido no Distrito Federal por meio da discretização em unidades de paisagem o que permitiu diferenciar os processos hidrológicos entre as áreas mais elevadas do relevo e as planícies de inundação. As simulações desse estudo confirmaram que a integridade dessas zonas ripárias é fundamental

para a redução da carga de sedimentos e favorece o aumento do escoamento subsuperficial e da recarga de aquíferos profundos.

No âmbito da segurança hídrica urbana Cunha e Pereira (2025) avaliaram a disponibilidade de água nas sub-bacias do Ribeirão Bom Jardim e do Alto Rio Uberabinha responsáveis pelo abastecimento de Uberlândia em Minas Gerais. Os resultados indicaram que após os devidos ajustes de sensibilidade e calibração o modelo representou satisfatoriamente o regime hidrológico no bioma Cerrado consolidando-se como um instrumento para a gestão sustentável. Por outro lado, Jovino et al. (2022) apresentaram uma análise multitemporal do uso do solo no manancial do Ribeirão do Feijão em São Paulo comparando períodos distintos e estimando uma produção média anual de sedimentos de cerca de zero vírgula vinte e sete toneladas.

A pesquisa identificou sub-bacias críticas ocupadas por pastagens e agricultura em áreas de maior declividade as quais foram apontadas como prioritárias para a implementação de programas de pagamento por serviços ambientais visando a mitigação de processos erosivos e a proteção da qualidade da água (Jovino et al., 2022). De maneira geral os trabalhos convergem ao apresentar o SWAT+ como uma ferramenta versátil capaz de espacializar processos e simular cenários que auxiliam na conservação da biodiversidade e no uso racional dos recursos naturais.

Entende-se aqui que deve haver de forma gradativa a transformação, sobretudo para o Brasil que possui problemáticas de dados e de análises tropicais já relatadas, para a utilização do SWAT+, uma vez que os resultados para ambientes do sul global com as novas implementações entregam mais fidedignidade as informações extraídas, além de evitar problemas de desativação para dormência, adequação de solos ou usos não existentes no modelo anterior. Outro ponto a se levantar é o incentivo a produção com o modelo via educação, uma vez que a comunidade do SWAT/SWAT+ mantém eventos ativos e fóruns de compartilhamento de informações, como também vídeos e cursos que diferenciam de outros que não mantém esse suporte tão próximo de novos e antigos pesquisadores.

4. Conclusão

A presente pesquisa permitiu compreender a trajetória histórica e científica do modelo SWAT no Brasil, evidenciando sua consolidação como uma das principais ferramentas de modelagem hidrológica aplicada em bacias hidrográficas nacionais. Observou-se que a evolução do modelo acompanhou o avanço das tecnologias computacionais e geoespaciais, especialmente com a integração a Sistemas de Informação Geográfica e ao sensoriamento remoto. Esse processo favoreceu o aumento da capacidade de simulação de variáveis hidrológicas e ambientais, ampliando sua aplicabilidade em estudos voltados ao planejamento territorial e à gestão dos recursos hídricos. Assim, o SWAT se tornou um instrumento relevante para apoiar análises ambientais em diferentes escalas.

No recorte temporal referente ao passado, especialmente entre 2000 e 2010, verificou-se que a aplicação do SWAT no Brasil ocorreu de forma gradual e ainda limitada, concentrando-se em estudos pioneiros voltados à simulação de vazão, erosão e transporte de sedimentos. Essa fase inicial foi marcada por esforços de adaptação do modelo às condições do hemisfério sul, considerando a complexidade edafoclimática brasileira e as limitações estruturais de dados disponíveis. Apesar do quantitativo reduzido de publicações, os trabalhos dessa etapa foram fundamentais para validar a ferramenta em ambientes tropicais e fortalecer a confiança acadêmica sobre sua aplicabilidade no país. Esse período consolidou as bases metodológicas para o crescimento posterior do uso do modelo.

No intervalo entre 2010 e 2020, identificou-se um crescimento expressivo da produção científica relacionada ao SWAT, impulsionado pela expansão do acesso à internet, pela maior disseminação de softwares de geoprocessamento e pela consolidação de grupos de pesquisa especializados em modelagem hidrológica. As análises bibliométricas indicaram aumento anual constante das publicações, além de forte presença de coautorias e colaboração institucional, demonstrando que o tema passou a ser desenvolvido de forma coletiva

e interdisciplinar. Também se destacou a ampliação da diversidade regional das pesquisas, com estudos distribuídos por diferentes biomas e realidades hidrológicas do Brasil, evidenciando o potencial do SWAT para responder a múltiplos desafios ambientais.

Entretanto, os resultados também demonstraram que as limitações estruturais permanecem como um dos principais entraves para a aplicação do modelo no contexto brasileiro. A escassez de dados hidrometeorológicos contínuos, a inconsistência de informações pedológicas e a baixa densidade de estações de monitoramento dificultam calibrações robustas e comprometem a confiabilidade das simulações em determinadas regiões. Além disso, observou-se que a calibração e validação do modelo ainda dependem fortemente da experiência do pesquisador e da disponibilidade de séries históricas confiáveis. Essas fragilidades reforçam a necessidade de investimentos em redes de monitoramento, padronização de bases de dados e desenvolvimento de metodologias adaptadas às particularidades tropicais.

Por fim, ao analisar as perspectivas futuras, conclui-se que o SWAT+ representa um avanço promissor para a modelagem hidrológica no Brasil, especialmente pela maior flexibilidade espacial e pela capacidade de representar com mais realismo unidades de paisagem e zonas ripárias. A tendência de utilização de ferramentas em nuvem e de integração com bases de dados globais também aponta para uma democratização do acesso e maior eficiência no processamento de informações ambientais complexas. Assim, a continuidade da evolução do SWAT no país dependerá do fortalecimento de iniciativas de capacitação acadêmica, da ampliação de bases de dados regionais e do incentivo à pesquisa aplicada voltada à gestão sustentável de bacias hidrográficas. Dessa forma, o SWAT e o SWAT+ consolidam-se como instrumentos estratégicos para subsidiar políticas públicas e ações de planejamento ambiental em diferentes escalas.

5. Agradecimentos

Agradecemos ao Instituto Federal do Maranhão (Campus Alcântara) pelo espaço de pesquisa. A FAPEMA (Fundação de Amparo à Pesquisa e ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Maranhão) e a EMAP (Empresa Maranhense de Administração Portuária) pela aceitação do projeto vigente do edital FAPEMA/EMAP nº 13/2024 apoio à pesquisa no Porto do Itaqui.

6. Referências

- Aghakouchak, A., & Habib, E. (2010). Application of a conceptual hydrologic model in teaching hydrologic processes. *International Journal of Engineering Education*, 26(4 (S1)), 963-973.
- Almeida, A. L. S. P., Macedo, D. R., Santos, H. A., Ribeiro, S. M. C., & Hughes, R. M. (2023). Managing water resources in complex tropical basins: Tailored SWAT ecohydrological modeling to the Rio das Velhas, Brazil. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 28, e33. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.282320230034>
- Almeida, G. C., Montenegro, A. A. A., Carvalho, A. A., Lourenço, V. R., Almeida, T. A. B., & Silva, M. J. (2022). Morphometric characterization of the Alto do Ipojuca hydrographic basin. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing*, 12(3), 99–108.
- Almeida, R. A., Pereira, S. B., & Pinto, D. B. F. (2018). Calibration and validation of the SWAT hydrological model for the Mucuri River Basin. *Engenharia Agrícola*, 38(1), 55–63. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v38n1p55-63/2018>
- Alvarenga, L. A., Carvalho, V. S. O., Oliveira, V. A., Mello, C. R., Colombo, A., Tomasella, J., & Melo, P. A. (2020). Hydrological simulation with SWAT and VIC Models in the Verde River Watershed, Minas Gerais.

Ambiente & Água – An Interdisciplinary Journal of Applied Science, 15(3). <https://doi.org/10.4136/ambiente-agua.2492>

Alves, J. C. B., Martins, L. L., Martins, W. A., Moraes, J. F. L., & Blain, G. C. (2021). Uso de dados meteorológicos de reanálise para a simulação da vazão na bacia hidrográfica do Ribeirão do Pinhal, Limeira/SP. *Caminhos de Geografia*, 22(80), 234–252. <https://doi.org/10.14393/RCG228054849>

Alves, W. S., Martins, A. P., & Ferreira, R. S. (2022). Modelagem aplicada na estimativa de vazão de uma bacia hidrográfica no sudoeste de Goiás, Cerrado Brasileiro. *Caminhos de Geografia*, 23(85), 261–282. <http://doi.org/10.14393/RCG238557899>

Amorim, J. da S., Viola, M. R., Junqueira, R., de Oliveira, V. A., & de Mello, C. R. (2020). Evaluation of satellite precipitation products for hydrological modeling in the Brazilian Cerrado biome. *Water*, 12(9), 2571. <https://doi.org/10.3390/w12092571>

Andrade, M. A., Mello, C. R. de, & Beskow, S. (2013). Simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica representativa dos Latossolos na região Alto Rio Grande, MG. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 17(1), 69–76.

Andrews, R.G., 1954. **The use of relative infiltration indices in computing runoff**. In: V.P. Singh, ed. Rainfall–runoff relationship. Littleton, CO: Water Resources Publications.

Aragão, R., Cruz, M. A. S., Amorim, J. R. A., Mendonça, L. C., Figueiredo, E. E., & Srinivasan, V. S. (2013). Análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo SWAT e simulação dos processos hidrossedimentológicos em uma bacia no agreste nordestino. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 37, 1091–1102.

Arnold, J. G. • Engel, B. A. and Srinivasan, R. (1993). A continuous time, grid cell watershed model. **Proceedings of the Application of Advanced Information Technologies: Effective Management of Natural Resources Conference**. ASAE, St. Joseph, MI.

Arnold, J. G. & Fohrer, N. (2005) SWAT2000: current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling. *Hydrol. Processes* 19(3), 563–572.

Arnold, J. G. (1990) **ROTO—a continuous water and sediment routing model**. In: Watershed Planning and Analysis in Action. (Proc. IR Conf., Watershed Mgt/IR Div/ASCE, Durango, Colorado), 580–590.

Arroio Junior, P. P., & Mauad, F. F. (2015). Simulação dos impactos das mudanças climáticas na vazão da bacia do Ribeirão do Feijão – SP. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 20(3), 741–751. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v20n3.p741-751>

Asgari, M., Yang, W., Lindsay, J., Shao, H., Liu, Y., Miranda, R. Q., & Dehnavi, M. M. (2023). Development of a knowledge-sharing parallel computing approach for calibrating distributed watershed hydrologic models. *Environmental Modelling & Software*, 164, 105708.

Baltokoski, V., Tavares, M. H. F., Machado, R. E., & Oliveira, M. P. de. (2010). Calibração de modelo para a simulação de vazão e de fósforo total nas sub-bacias dos rios Conrado e Pinheiro – Pato Branco (PR). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 34, 253–261.

Bieger, K., Arnold, J. G., Rathjens, H., White, M. J., Bosch, D. D., Allen, P. M., Volk, M., & Srinivasan, R. (2017). Introduction to SWAT+, a completely restructured version of the Soil and Water Assessment Tool. **Journal of the American Water Resources Association**, 53(1), 115–130.

Blainski, É., Acosta Porras, E. A., Garbossa, L. H. P., & Pinheiro, A. (2017b). Simulation of land use scenarios in the Camboriú River Basin using the SWAT model. **Brazilian Journal of Water Resources**, 22, e33. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.011716110>

Blainski, E., Acosta, E., & Nogueira, P. C. do P. (2017a). Calibração e validação do modelo SWAT para simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica do litoral norte catarinense. **Ambiente & Água – An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, 12(2). <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1951>

Bonumá, N. B., Rossi, C. G., Arnold, J. G., Reichert, J. M., Minella, J. P., Allen, P. M., & Volk, M. (2014). Simulating landscape sediment transport capacity by using a modified SWAT model. **Journal of Environmental Quality**, 43(1), 55–66. <https://doi.org/10.2134/jeq2013.05.0196>

Bressiani, D. A., Gassman, P. W., Fernandes, J. G., Garbossa, L., Srinivasan, R., Bonuma, N. B., & Mendiando, E. M. (2015). A review of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) applications in Brazil: Challenges and prospects. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, 8(3), 1–27.

Brighenti, T. M., Bonumá, N. B., & Chaffe, P. L. B. (2016). Calibração hierárquica do modelo SWAT em uma bacia hidrográfica catarinense. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, 21(1), 53–64. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v21n1.p53-64>

Campos, Fábio Luiz Mação; Coelho, André Luiz Nascentes; Bressiani, Danielle de Almeida; Campos, Ivna Carla Herzog Mação; Uso do modelo hidrológico SWAT+ para quantificação e espacialização de processos em apoio ao planejamento ambiental. **Revista Pantaneira**, V. 24, EDIÇÃO ESPECIAL CIGEPAM(UFC), UFMS, Aquidauana-MS, 2024.

Carvalho, V. S. O., Alvarenga, L. A., Oliveira, C. M. M., Tomasella, J., Colombo, A., & Melo, P. A. (2021). Impact of climate change on monthly streamflow in the Verde River Basin using two hydrological models. **Ambiente & Água – An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, 16(3). <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2683>

Castro, K.B., (2013). **Avaliação do modelo SWAT na simulação da vazão em bacia agrícola do Cerrado intensamente monitorada**. Dissertação (Mestrado). Brasília, UnB.

Castro, R. A. (2014). Simulação de produção de sedimentos com a utilização do modelo SWAT na bacia do Rio das Pedras (Guarapuava-PR). **Revista Geonorte**, 10(1), 297–301. ISSN 2237-1419.

Castro, R. A., & Machado, E. (2019). Análise de sensibilidade de parâmetros hidrológicos na bacia do Rio das Pedras, Guarapuava–PR. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 12(5), 1746–1756. <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>

Chagas, A. M. S., Montenegro, A. A. A., Lins, F. A. C., & Farias, C. W. L. A. (2022). Análise da umidade do solo em bacia experimental no semiárido pernambucano utilizando o modelo SWAT. **Agrometeoros**, 30,

e026993.

Conceição, G., & Miranda Junior, G. X. (2026). Avaliação do risco ambiental da suinocultura intensiva em bacias agrícolas por modelagem hidrológica, geotecnologias e análise multicritério. *Revista DELOS*, 19(76), 1–23. <https://doi.org/10.55905/rdelosv19.n76-003>

Cordeiro, A. M., Oliveira, G. M. D., Rentería, J. M., & Guimarães, C. A. (2007). Revisão sistemática: uma revisão narrativa. *Revista do colégio brasileiro de cirurgiões*, 34, 428–431.

Correa, E. S. (2018). O efeito da alteração nas entradas pedológicas no modelo de SWAT: Estudo de caso na Bacia Hidrográfica do Rio Tapajós. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, 9(6).

Correa, E. S., Magrath, D. G., & Ribeiro, C. B. M. (2017). Influência da variação dos parâmetros climáticos na modelagem de SWAT: Estudo de caso bacia hidrográfica do Rio Tapajós. *Agroecossistemas*, 9(1), 84–98.

Correa, E. S. (2018). O efeito da alteração nas entradas pedológicas no modelo de SWAT: estudo de caso na Bacia Hidrográfica do Rio Tapajós. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, Edição Especial do Congresso de Gestão Ambiental do Baixo Amazonas (CONGABA), v. 9, n. 6, ago. 2018.

Cunha, A. L. S., & Pereira, C. E. (2025). Modelagem hidrológica com SWAT+ para avaliação da disponibilidade hídrica em sub-bacias que abastecem Uberlândia-MG. *Revista PPC – Políticas Públicas e Cidades*, 14(2), 1–19.

da Silva, V. de P. R., Silva, M. T., Singh, V. P., de Souza, E. P., Braga, C. C., de Holanda, R. M., Almeida, R. S. R., de Sousa, F. de A. S., & Braga, A. C. R. (2018c). Simulation of stream flow and hydrological response to land-cover changes in a tropical river basin. *Catena*, 162, 328–338. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.11.024>

Dantas, J. C., Silva, M. A. da, Silva, R. M. da, & Vianna, P. C. G. (2015). Simulação vazão–erosão usando o modelo SWAT para uma grande bacia da região semiárida da Paraíba. *Geociências (São Paulo)*, 34(4), 816–827.

de Mello, K., Randhir, T. O., Valente, R. A., & Vettorazzi, C. A. (2017). Riparian restoration for protecting water quality in tropical agricultural watersheds. *Ecological Engineering*, 108, 514–524. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.06.049>

de Oliveira, V. A., de Mello, C. R., Beskow, S., Viola, M. R., & Srinivasan, R. (2019). Modeling the effects of climate change on hydrology and sediment load in a headwater basin in the Brazilian Cerrado biome. *Ecological Engineering*, 133, 20–31. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.04.004>

de Oliveira, V. A., de Mello, C. R., Viola, M. R., & Srinivasan, R. (2017). Assessment of climate change impacts on streamflow and hydropower potential in the headwater region of the Grande River basin, Southeastern Brazil. *International Journal of Climatology*. <https://doi.org/10.1002/joc.5138>

Deus, R., Deus, S. S., & Neves, R. J. J. (2020). Uso do código SWAT na previsão de vazão dos rios da bacia hidrográfica Tocantins-Araguaia. *Novos Cadernos NAEA*, 23(2), 179–200.

- Devia, G. K., Ganasri, B. P., & Dwarakish, G. S. (2015). A review on hydrological models. **Aquatic procedia**, 4, 1001-1007.
- Di Luzio, M., Srinivasan, R. & Arnold, J. G. (2002) Integration of watershed tools and SWAT model into BASINS. **J. Am. Water Res. Assoc.** 38(4), 1127–1141.
- Di Luzio, M., Srinivasan, R. & Arnold, J. G. (2004) A GIS-coupled hydrological model system for the watershed assessment of agricultural nonpoint and point sources of pollution. **Trans. GIS** 8(1), 113–136.
- Di Luzio, M., Srinivasan, R., Arnold, J. G., & Neitsch, S. L. (2002). **ArcView interface for SWAT2000: User's guide**. Texas Water Resources Institute.
- Dile, Y. T., Daggupati, P., George, C., Srinivasan, R., & Arnold, J. (2016). Introducing a new open source GIS user interface for the SWAT model. **Environmental Modelling & Software**, 85, 129–138.
- dos Santos, J. Y. G., Montenegro, S. M. G. L., da Silva, R. M., Santos, C. A. G., Quinn, N. W., Dantas, A. P. X., & Neto, A. R. (2021). 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**, 203, 105308. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105308>
- Dos Santos, V., Laurent, F., Abe, C., & Messner, F. (2018). Hydrologic response to land use change in a large basin in Eastern Amazon. **Water**, 10(4), 429. <https://doi.org/10.3390/w10040429>
- Douglas-Mankin, K. R., Srinivasan, R., & Arnold, J. G. (2010). Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model: Current developments and applications. **Transactions of the ASABE**, 53(5), 1423-1431.
- Engel, B. A., Srinivasan, R., Arnold, J., Rewerts, C., & Brown, S. J. (1993). Nonpoint source (NPS) pollution modeling using models integrated with geographic information systems (GIS). **Water Science and Technology**, 28(3–5), 685–690.
- Farias, C. W. L. A., Viana, J. F. S., Miranda, R. Q., Silva, S. F., Vasco, G., Montenegro, S. M. G. L., & Galvêncio, J. D. (2023). Técnica de calibração para modelagem da bacia hidrográfica do Rio São Francisco, Brasil, utilizando o SWAT. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 16(3), 1621–1628.
- Ferreira, R. S., & Uagoda, R. E. S. (2017). Análise da predição do balanço hídrico da bacia do ribeirão do Gama-DF através do modelo SWAT. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 10(3), 880–893
- Fisher, J. R. B., Acosta, E. A., Dennedy-Frank, P. J., Kroeger, T., & Boucher, T. M. (2018). Impact of satellite imagery spatial resolution on land use classification accuracy and modeled water quality. **Remote Sensing in Ecology and Conservation**, 4(2), 137–149. <https://doi.org/10.1002/rse2.64>
- Franco, A. C. L., de Oliveira, D. Y., & Bonumá, N. B. (2020). Comparison of single-site, multi-site and multivariable SWAT calibration strategies. **Hydrological Sciences Journal**, 65(9), 1551–1566. <https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1750640>
- Freire-Silva, J., Miranda, R. Q., & Candeias, A. L. B. (2022). Análise dos Modelos Digitais de Elevação (PE3D, SRTM-30, SRTM-90, ASTER GDEM, TOPODATA, TANDEM-X, ALOS PALSAR e ALOS

AW3D30) e a necessidade da produção de dados altimétricos em excelência no Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 15, 1543.

Freire-Silva, J., Paz, Y. M., Silva, P. P. L., Miranda, R. Q., & Cavalcanti, E. R. A. C. S. (2024). Análise espacial de cenários ao potencial erosivo da bacia do rio Mearim (Maranhão). *Journal of Hyperspectral Remote Sensing*, 13, 538–587.

Garcia, G. J., Garcia, L. B., Gamero, M. E., Vettorazzi, C. A., Kröenert, R., Volk, M., & Meyer, B. (2006). Impacto do uso da terra na erosão do solo e no balanço e qualidade de água na bacia do Rio Corumbataí-SP. *Holos Environment*, 6(2), 118–136.

Garg, V., et al., 2013. Assessment of the effect of slope on runoff potential of a watershed using NRCS-CN method. *International Journal of Hydrology Science and Technology*,

Gil, A. C., & Vergara, S. C. (2015). **Tipo de pesquisa**. Universidade Federal de Pelotas. Rio Grande do Sul, 31.

Gil, Antonio Carlos et al. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: Atlas, 2002.

Gonçalves, A. C. P. C. M., Fernandes, C. V. S., & Hardt, L. P. A. (2007). Agregação de novas variáveis ao processo de planejamento urbano e regional sob a perspectiva de gestão dos recursos hídricos. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 12(4), 199–210.

Gosling, S. N., Taylor, R. G., Arnell, N. W., & Todd, M. C. (2011). A comparative analysis of projected impacts of climate change on river runoff from global and catchment-scale hydrological models. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15, 279–294. <https://doi.org/10.5194/hess-15-279-2011>

Henriques, I. G. N., Silva, R. M. da, & Silva, L. P. e. (2017). **Análise espacial dos processos hidrossedimentológicos na bacia do rio Taperoá-PB**. In Os desafios da geografia física na fronteira do conhecimento: Geotecnologias e modelagem espacial em geografia física (E-book, v. 1). <https://doi.org/10.13031/2013.23153>

J. R. Williams , J. G. Arnold , J. R. Kiniry , P. W. Gassman & C. H. Green (2008) History of model development at Temple, Texas, *Hydrological Sciences Journal*, 53:5, 948-960, DOI: 10.1623/hysj.53.5.948

Jajarmizadeh, M., Harun, S., & Salarpour, M. (2012). A review on theoretical consideration and types of models in hydrology. *Journal of Environmental Science and Technology*, 5(5), 249-261.

Jovino, E. S., Angelini, R., Costa, C. W., Bressiani, D. A., & Cunha, K. P. V. (2022). Impactos do uso e cobertura do solo na produção de sedimentos em área de manancial peri-urbano tropical. *Sociedade e Natureza*, 34, e64640. <https://doi.org/10.14393/SN-v34-2022-64640>

Junqueira, C. A. R., & Silva, R. S. da. (2008). Avaliação ambiental aplicável a bacias hidrográficas no meio urbano: Análise dos métodos Amorim & Cordeiro, PESMU e SWAT. *Revista de Estudos Ambientais*, 10(2), 6–23.

Kiniry, J. R., Sanderson, M. A., Williams, J. R., Tischler, C. R., Hussey, M. A., Ocumpaugh, W. R., Read, J.

- C., VanEsbroeck, G. & Reed, R. L. (1996) Simulating Alamo switchgrass with the ALMANAC model. **Agron. J.** 88, 602–606.
- Knisel, W. G. (1980) **CREAMS, a field scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems**. US Dept. Agric. Conserv. Res. Report. no. 26.
- Lakatos, E. M., & Marconi, M. A. (2017). *Fundamentos de metodologia científica* (5ª ed.). Atlas.
- Lelis, T. A., & Calijuri, M. L. (2010). Modelagem hidrossedimentológica de bacia hidrográfica na região sudeste do Brasil, utilizando o SWAT. **Ambiente & Água – An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, 5(2), 158–174.
- Lelis, T. A., Calijuri, M. L., Fonseca, A. S. da, & Lima, D. C. de. (2011). Impactos causados pelas mudanças climáticas nos processos erosivos de uma bacia hidrográfica: Simulação de cenários. **Ambiente & Água – An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, 6(2). <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.200>
- Lelis, T. A., Calijuri, M. L., Santiago, A. da F., Lima, D. C. de, & Rocha, E. de O. (2012). Análise de sensibilidade e calibração do modelo SWAT aplicado em bacia hidrográfica da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 36, 623–634.
- Leonard, R. A., Knisel, W. G. & Still, D. A. (1987) GLEAMS: Groundwater loading effects of agricultural management systems. **Trans. Am. Soc. Agric. Engrs** 30(5), 1403–1418.
- Lima, J. E. F. W., Montenegro, S. M. G. L., Montenegro, A. A. A., & Koide, S. (2014). Comparative hydrology: Relationships among physical characteristics, hydrological behavior, and results of the SWAT model in different regions of Brazil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 7(6), 1187–1195.
- Lins, F. A. C., Montenegro, A. A. A., Farias, C. W. L. A., Chagas, A. M. S., Miranda, R. Q., & Galvêncio, J. D. (2021). Análise da dinâmica temporal da evapotranspiração real em uma bacia hidrográfica do semiárido através de modelagem hidrológica e sensoriamento remoto. **Irriga**, 26(3), 543–564. <http://dx.doi.org/10.15809/irriga.2021v26n3p543-564>
- Louzada, V. M., & Ribeiro, C. B. de M. (2019). Impacts of land-use change on southeast Amazonia basin streamflow. **Ambiente & Água – An Interdisciplinary Journal of Applied Science**. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2303>
- Machado, R. E., & Vettorazzi, C. A. (2003b). Simulação da produção de sedimentos para a microbacia hidrográfica do Ribeirão dos Marins (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 27, 735–741.
- Machado, R. E., Vettorazzi, C. A., & Cruciani, D. E. (2003a). Simulação de escoamento em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, 8(1), 147–155.
- Machado, R. E., Xavier, A. C., Cruciani, D. E., & Vettorazzi, C. A. (2007). Efeito do nível de subdivisão em uma bacia hidrográfica na simulação da produção de sedimentos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, 12(4), 49–58.

- Marchioro, E., Fernandes, N. F., Macedo, J. R. de, Bhering, S. B., Gonçalves, A. O., & Prado, R. B. (2014). Modelagem da produção de sedimentos usando cenário ambiental alternativo no noroeste do Rio de Janeiro – Brasil. **Geografias**, 10(1).
- Martins, L. L., Martins, W. A., Moraes, J. F. L., Pedro Júnior, M. J., & De Maria, I. C. (2020). Calibração hidrológica do modelo SWAT em bacia hidrográfica caracterizada pela expansão do cultivo da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 13(2), 576–594.
- Martins, W. A., Martins, L. L., De Maria, I. C., Moraes, J. F. L., & Pedro Júnior, M. J. (2021). Reduction of sediment yield by riparian vegetation recovery at distinct levels of soil erosion in a tropical watershed. **Ciência e Agrotecnologia**, 45, e028220. <https://doi.org/10.1590/1413-7054202145028220>
- McCuen, R. H., Bondelid, T. (1983). Estimating unit hydrograph peak rate factors. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, 109(2), 238–250. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1983\)109:2\(238\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1983)109:2(238))
- Melo Neto, J. de O., Silva, A. M. da, Mello, C. R. de, & Mélo Júnior, A. V. (2014). Simulação hidrológica escalar com o modelo SWAT. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, 19(1), 177–188.
- Miranda, R. Q., Nobrega, R., Silva, E. L. R., Freire-Silva, J., Araujo Filho, J. C., Moura, M. S. B., Barros, A. H. C., Saraiva, A., Verhoef, A., Yang, W., Shao, H., Srinivasan, R., Ziadat, F., Montenegro, S. M. G. L., Araujo, M. S. B., & Galvêncio, J. D. (2025). A scalable framework for soil property mapping tested across a highly diverse tropical data-scarce region. **Soil Advances**, 4, 100064.
- Mockus, V., 1949. **Estimation of total (peak rates of) surface runoff for individual storms**. Exhibit A of Appendix B, Interim Survey Rep. Washington, DC: Grand (Neosho) River Watershed, USDA.
- Monteiro, J. A. F., Strauch, M., Srinivasan, R., Abbaspour, K., & Gücker, B. (2016). Accuracy of grid precipitation data for Brazil: Application in river discharge modelling of the Tocantins catchment. **Hydrological Processes**, 30(9), 1419–1430. <https://doi.org/10.1002/hyp.10708>
- Moriasi, D.N., et al. (2007) Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. **Transactions of the ASABE**, 50, 885-900.
- Mugnaini, R., & Strehl, L. (2008). Recuperação e impacto da produção científica na era Google: uma análise comparativa entre o Google Acadêmico e a Web of Science. **Encontros Bibli: revista eletrônica de biblioteconomia e ciência da informação**, (Esp), 92-105.
- Nascimento, J. M., Frade, T. G., & Silva, R. M. (2018). Modelagem da resposta do escoamento em uma bacia do semiárido da Paraíba utilizando o modelo SWAT. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 11(3), 1137–1150.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R.R., King, K.W., 2012. **Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2000, Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation, Version 2000**. Grassland Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service, Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, Temple, Texas.
- Neves, F. F., Silva, F. G. B., & Crestana, S. (2006). Uso do modelo AVSWAT na avaliação do aporte de

nitrogênio (N) e fósforo (P) aos mananciais de uma microbacia hidrográfica contendo atividade avícola. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, 11(4), 311–317.

NEVES, José Luis. Pesquisa qualitativa: características, usos e possibilidades. **Caderno de pesquisas em administração**, São Paulo, v. 1, n. 3, p. 1-5, 1996.

Nogueira, M. P., Silva, P. R., & Minoti, R. T. (2024). 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 (RBCIAMB)**, 59, e1743. <https://doi.org/10.5327/Z2176-94781743>

Nunes, F. M. S., Srinivasan, V. S., Aragão, R., & Brito, Y. M. A. (2022). Proposição de uma metodologia de avaliação hidrossedimentológica e de sensibilidade de parâmetros através do modelo SWAT. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales**, 15(3), 1220–1239.

Oliveira, C. M. M., Alvarenga, L. A., Silva, V. O., Carvalho, V. S. O., Caminha, A. R., & Melo, P. A. (2024). Projeção dos eventos de seca meteorológica e hidrológica na bacia hidrográfica do Rio Verde. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 39, e39240059. <http://dx.doi.org/10.1590/0102-7786390059>

Paim, J. B., & Menezes, J. T. (2009). Estimativa do balanço sedimentar da bacia do rio Tijucas (SC–Brasil) a partir da aplicação do modelo hidrológico SWAT. *Revista Geográfica Acadêmica*, 3(2), 5–14.

Passos, F. O., Silva, B. C., & Silva, F. G. B. (2021). Avaliação de impactos de mudanças no uso e manejo do solo sobre as vazões da bacia hidrográfica do Ribeirão José Pereira, utilizando o modelo SWAT. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 14(2), 619–633.

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

Paz, Y. M., Freire-Silva, J., Holanda, R. M., & Galvêncio, J. D. (2022). Planejamento e gestão ambiental de bacias hidrográficas a partir da modelagem hidrossedimentológica e estudo de cenários alternativos de uso e cobertura do solo. **UNESP, Geociências**, 41(3), 675–687.

Paz, Y. M., Galvêncio, J. D., Holanda, R. M., Srinivasan, R., & Jones, C. A. (2018). Análise de sensibilidade e calibração espacial do modelo SWAT aplicado em uma bacia do litoral pernambucano através de dados climáticos observados e de reanálise. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 11(1), 371–389.

Paz, Y. M., Silva, J. F., Holanda, R. M., & Galvêncio, J. D. (2022). Avaliação espacial da produção de sedimentos e estratégias para redução dos processos erosivos em bacia hidrográfica no Nordeste do Brasil. **Derbyana**, 43, e753. <https://doi.org/10.14295/derb.v43.753>

Pereira, D. R., Martinez, M. A., Almeida, A. Q., Pruski, F. F., Silva, D. D., & Zonta, J. H. (2014). Hydrological simulation using SWAT model in headwater basin in southeast Brazil. **Engenharia Agrícola**, 34(4), 789–799.

Pereira, D. R., Martinez, M. A., Pruski, F. F., & da Silva, D. D. (2016). Hydrological simulation in a basin of typical tropical climate and soil using the SWAT model Part I: Calibration and validation tests. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, 7, 14–37. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2016.05.002>

Pires, N. R., & Ribeiro, C. B. M. (2022). Regime de recarga subterrânea natural nas bacias dos principais mananciais de abastecimento de Juiz de Fora. **RMRH - Revista Mineira de Recursos Hídricos**, 3, e022008.

Rodrigues Junior, J. C., Tavares, D. M. F., Farias, V. E. M., Santana, A. C. A., Montenegro, S. M. G. L., Oliveira, L. M. M., & Paiva, A. L. R. (2023). Análise estatística multivariada de variáveis hidrológicas na bacia hidrográfica do rio Pajeú - PE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 16(6), 3246–3262.

Rodrigues, D. B. B., H. V. Gupta, and E. M. Menciondo (2014), A blue/green water-based accounting framework for assessment of water security, **Water Resour. Res.**, 50, 7187–7205, doi:10.1002/2013WR014274.

Rodrigues, J. A. M., Viola, M. R., Alvarenga, L. A., de Mello, C. R., Chou, S. C., de Oliveira, V. A., Uddameri, V., & Moraes, M. A. V. (2020). Climate change impacts under representative concentration pathway scenarios on streamflow and droughts of basins in the Brazilian Cerrado biome. **International Journal of Climatology**, 40(5), 2511–2526. <https://doi.org/10.1002/joc.6345>.

Rufino, P. R., Cardozo, F. S., & Pereira, G. (2024). Calibração e validação do modelo hidrológico SWAT para a simulação da vazão de uma bacia amazônica altamente preservada. **Boletim Goiano de Geografia**, 44, e68711.

S. Verma, R. K. Verma, S. K. Mishra, A. Singh & G. K. Jayaraj (2017): A revisit of NRCS-CN inspired models coupled with RS and GIS for runoff estimation, **Hydrological Sciences Journal**, DOI: 10.1080/02626667.2017.1334166

Serrão, E. A. de O., Silva, M. T., Ferreira, T. R., Ataíde, L. C. P. de, Santos, C. A., Lima, A. M. M. de, Silva, V. de P. R. da, Sousa, F. de A. S. de, & Gomes, D. J. C. (2021). Impacts of land use and land cover changes on hydrological processes and sediment yield determined using the SWAT model. **International Journal of Sediment Research**.

Sherman, L.K. (1942). Hydrographs of runoff. Physics of the Earth, IX, **Hydrology**. O. E. Meinzer, ed., McGraw-Hill, New York.

Silva, A. F., & Farias, C. W. L. A. (2021). Análise morfométrica da bacia hidrográfica do Rio Mundaú utilizando o modelo SWAT. **Revista Semiárido De Visu**, 9(2), 76–86. <https://doi.org/10.31416/rsdv.v9i2.216>

Silva, A. K. L., Sousa, A. M. L. de, Santos, J. T. S. dos, Villela, J. M., Martorano, L. G., & Crestana, S. (2018). Estimation of sediment production in oil palm expansion areas in the Amazon. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 22(5), 344–348. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n5p344-348>

Silva, J. N. B. da, Silva, J. L. B., Ferreira, M. L., & Galvêncio, J. D. (2025). Estimativas do sequestro de carbono em espécies predominantes na vegetação de caatinga: compreendendo a dinâmica do carbono em um bioma semiárido. **Revista Brasileira De Meio Ambiente**, 13(2). Recuperado de <https://www.revistabrasileirademeioambiente.com/index.php/RVBMA/article/view/1879>

Silva, L. R. C., Melo, C. M. P., Penzo, T. A., Barbosa, T. R. G., & Ferreira, V. C. R. (2021). Projeção SWAT

para análise da pluviosidade da bacia hidrográfica do Rio Ipojuca. **Revista Interciência & Sociedade**, 3.

Silva, R. M. da, Henriques, I. G. N., & Cazé, J. F. (2018b). Simulação das mudanças de uso e ocupação do solo e seus efeitos nas características hidrossedimentológicas em uma bacia do bioma Caatinga. **Revista de Geografia (Recife)**, 35(1)

Silva, T. P., Bressiani, D., Ebling, E. D., & Reichert, J. M. (2023). Best management practices to reduce soil erosion and change water balance components in watersheds under grain and dairy production. **International Soil and Water Conservation Research**, 11(4), 639–652. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2023.06.003>

Soares, G., Bandim, C., Silveira, N., Barros, J., Silva, J., Galvêncio, J. (2024). Análise do balanço hídrico da bacia hidrográfica do Riacho Cachoeira, Serra Talhada, Pernambuco. **Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto**, v.5, n.2, p.18-30.

Souza, V. A. S. de, Rotunno Filho, O. C., Moreira, D. M., Rudke, A. P., & Sá, M. R. T. de. (2019). Dinâmica do desmatamento na Amazônia e seus impactos na hidrologia: Bacia do rio Machadinho – Rondônia, Brasil. **Ciência Florestal**, 29(3), 1004–1018. <https://doi.org/10.5902/1980509835333>

Srinivasan, R., & Arnold, J. G. (1994). Integration of a basin-scale water quality model with GIS. **Water Resources Bulletin**, 30(3).

Strauch, M., Bernhofer, C., Koide, S., Volk, M., Lorz, C., & Makeschin, F. (2012). Using precipitation data ensemble for uncertainty analysis in SWAT streamflow simulation. **Journal of Hydrology**, 414–415, 413–424. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.11.014>

Strauch, M., Lima, J.E.F.W., Volk, M., Lorz, C., Makeschin, F., 2013. The impact of Best Management Practices on simulated streamflow and sediment load in a Central Brazilian catchment. **Journal of Environmental Management** 127, S24–S36

Tibúrcio, I. M., Pinheiro-Neto, V. R., Bello, R. K. dos S., Tôrres Silveira, N., Santana, S. H. C. de., Silva, J. N. B., Galvêncio, J. D., (2024). Projeção e Análise dos Impactos das Mudanças Climáticas no Balanço Hídrico na Bacia Hidrográfica do Moxotó-PE. **Meio Ambiente (Brasil)**, v.6, n.1, p.62-70.

Tibúrcio, I. M., Silveira, N. T., Santos, T. O., Miranda, R. Q., & Galvêncio, J. D. (2023). Balanço hídrico e mudanças climáticas no Semiárido Pernambucano: Aplicabilidade do Sistema de Unidades de Respostas Hidrológicas para Pernambuco (SUPer). **Revista Brasileira de Geografia Física**, 16, 1657.

TR-20 PROGRAM. "Computer Program for Project Formulation-Hydrology," Technical Release j. No. 20, Supplement No. 1, Central Technical Unit Soil Conservation Service, Washington, D.C., 1969.

Trentin, R., Laurent, F., & Robaina, L. E. S. (2023). O impacto do uso da terra sobre o balanço hídrico na bacia hidrográfica do Rio Santa Maria – Oeste do Rio Grande do Sul – Brasil. **ParaOnde!?**, 17(1), 70–88. <https://doi.org/10.22456/1982-0003.129906>

Trentin, R., Robaina, L. E. S., & Laurent, F. (2021). Definição das unidades de resposta hidrológica na bacia hidrográfica do Rio Santa Maria – RS. **Caminhos de Geografia**, 22(84), 269–284. <https://doi.org/10.14393/RCG228457131>

Uzeika, T., Merten, G. H., Minella, J. P. G., & Moro, M. (2012). Use of the SWAT model for hydro-sedimentologic simulation in a small rural watershed. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 36(2), 557–565. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000200023>

Vergara, Fernán; Noda, Fernanda; Souza, Dener; Oliveira, Roberta (2021). Aplicação do Modelo Soil And Water Assesment Tool (Swat) na bacia hidrográfica do Ribeirão Taquaruçu. **Revista de Geografia e Ordenamento do Território (GOT)**, n.º 21 (Junho). Centro de Estudos de Geografia e Ordenamento do Território, p. 159-187, [dx.doi.org/ 10.17127/got/2021.21.007](https://doi.org/10.17127/got/2021.21.007)

Wang, Y., Jiang, R., Xie, J., Zhao, Y., Yan, D., & Yang, S. (2019). Soil and water assessment tool (SWAT) model: A systemic review. **Journal of Coastal Research**, 93(SI), 22-30.

Williams, J. R., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Gassman, P. W., & Green, C. H. (2008). History of model development at Temple, Texas. **Hydrological Sciences Journal**, 53(5), 948–960. <https://doi.org/10.1623/hysj.53.5.948>

Williams, J. R., Nicks, A. D. & Arnold, J. G. (1985) SWRRB, a simulator for water resources in rural basins. **ASCE Hydr. J.** 111(6), 970–986.

Williams, J.R.; Jones, C.A.; Kiniry, J.R.; Spanel, D.A. The EPIC Crop Growth Model. **Trans. ASAE** 1989, 32, 0497–0511, <https://doi.org/10.13031/2013.31032>.

Zanin, P. R., Bonuma, N. B., & Corseuil, C. W. (2018). Hydrosedimentological modeling with SWAT using multi-site calibration in nested basins with reservoirs. **Brazilian Journal of Water Resources**, 23, e54. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.231820170153>