



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Calibração do modelo SWAT com dados do CHIRPS para a bacia hidrográfica do Teles Pires

Lorena Conceição Paiva de Ataíde¹, Francisco Carlos Lira Pessoa², Edivaldo Afonso de Oliveira Serrão³

¹ Doutoranda no Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal do Pará, e-mail: lorenaataide07@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2022-6798>

² Professor da Universidade Federal do Pará vinculado à Faculdade de Engenharia Sanitária e Ambiental (FAESA) e ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil (PPGEC). E-mail: fcfpessoa@ufpa.br ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6496-9043>

³ Pós-Doutorado no Instituto Tecnológico Vale, Desenvolvimento Sustentável (ITV-DS), inserido no Grupo Territórios e Recursos Naturais. E-mail: oliveiraserrao@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2376-847X>

Artigo recebido em 13/05/2025 e aceito em 03/02/2026

RESUMO

A baixa densidade da rede de monitoramento hidrológico na região Amazônica e a ausência de homogeneidade nas séries temporais impedem a investigação dos componentes atuantes na bacia hidrográfica. O modelo hidrológico SWAT permite suprir o déficit de informações fluviométricas, para tanto, é necessário realizar a calibração e validação dos parâmetros que descrevem as características físicas da bacia. Utilizando como dado de entrada a precipitação via sensoriamento remoto, a pesquisa objetivou calibrar e validar o SWAT para a Bacia Hidrográfica do rio Teles Pires, através do software SWAT-CUP (Calibration and Uncertainty Procedures), aplicando o algoritmo Sequential Uncertainty Fitting (SUFI-2) para a analisar a incerteza dos parâmetros mais sensíveis ao modelo. O desempenho do SWAT foi avaliado por meio dos índices estatísticos: coeficiente de determinação (R^2), a métrica de eficiência normalizada de Nash e Sutcliffe, Percent BIAS e a Eficiência Kling-Gupta (KGE). Os resultados mostraram que o SWAT apresentou forte correspondência entre as vazões observadas e simuladas, nas fases de calibração e validação, evidenciado pelos altos valores das métricas de avaliação. Além disso, o modelo demonstrou excelente correspondência entre os picos de vazão e fluxos de base, sendo capaz de rastrear as tendências sazonais das vazões mensais para a bacia do Teles Pires. Portanto, os resultados obtidos não apenas permitem a compreensão do comportamento hidrológico da bacia, mas também auxiliam na avaliação de impactos ambientais, manejo de bacias hidrográficas, avaliação do balanço hídrico e estudos sobre mudanças climáticas. Palavras-chave: Modelagem Hidrológica, Amazônia, Cerrado, SWAT-CUP, Vazão

Calibration of the SWAT model with CHIRPS data for the Teles Pires watershed

ABSTRACT

The low density of the hydrological monitoring network in the Amazon region and the lack of homogeneity in the time series prevent the investigation of the components acting on the river basin. The SWAT hydrological model makes it possible to make up for the shortfall in fluviometric information. To do so, it is necessary to calibrate and validate the parameters that describe the physical characteristics of the basin. Using remote sensing precipitation as input data, the research aimed to calibrate and validate SWAT for the Teles Pires River Basin, using the SWAT-CUP (Calibration and Uncertainty Procedures) software, applying the Sequential Uncertainty Fitting (SUFI-2) algorithm to analyze the uncertainty of the most sensitive parameters in the model. SWAT's performance was assessed using statistical indices: coefficient of determination (R^2), the Nash and Sutcliffe normalized efficiency metric, Percent BIAS and the Kling-Gupta Efficiency (KGE). The results showed that SWAT presented a strong correspondence between observed and simulated flows in the calibration and validation phases, as evidenced by the high values of the evaluation metrics. In addition, the model showed excellent correspondence between peak flows and base flows, and was able to track seasonal trends in monthly flows for the Teles Pires basin. Therefore, the results obtained not only allow for an understanding of the hydrological behavior of the basin, but also help in the assessment of environmental impacts, watershed management, water balance assessment and climate change studies.

Keywords: Hydrological Modeling, Amazon, Cerrado, SWAT-CUP, Flow

Introdução

A investigação dos componentes atuantes em bacias hidrográficas é fundamental para compreender o ciclo da água e os impactos resultantes das alterações destes. Tucci (1993) cita que o conhecimento da bacia hidrográfica permite observar em detalhes a variação dos diferentes processos que ocorrem nela, e com base no registro das variáveis envolvidas, é possível compreender os fenômenos.

Embora o ciclo hidrológico seja um sistema relativamente fácil de entender, quantificar os processos envolvidos é uma tarefa complexa (Suryavanshi et al., 2017). Esse conhecimento requer a coleta e interpretação contínua dos dados obtidos nas estações de medição, pois a confiabilidade se torna mais importante à medida que as séries históricas se tornam mais extensas (Pessoa et al., 2021). Contudo, Fassoni-Andrade et al. (2023) relatam que a baixa densidade da rede e a ausência de homogeneidade nas séries temporais impedem um monitoramento confiável com dados de campo.

Diversos estudos apontam a dificuldade de realizar análises hidrológicas em bacias hidrográficas devido a disponibilidade limitada de estações de medição, seja de chuva ou vazão (Collischonn et al., 2008; Blanco et al., 2013; Almeida et al., 2015; Diaz et al., 2018; Almagro et al., 2021; Pessoa et al., 2021; Mendonça et al., 2022). Nobre et al. (2009) salientam que por possuir grande extensão territorial e difícil acesso em áreas de floresta, a região Amazônica apresenta baixa densidade de estações, o que pode causar incertezas significativas no entendimento dos diferentes processos relativos aos mecanismos dinâmicos do clima e sua variabilidade espacial.

Devido ao elevado custo e à dificuldade na obtenção de medidas em áreas de difícil acesso, modelos matemáticos têm sido utilizados para estudos hidrológicos. Modelos baseados em processos físicos, apoiados pelo sensoriamento remoto, configuram-se como ferramentas adequadas para a compreensão dos processos hidrológicos amazônicos, além de possibilitarem a estimativa de variáveis hidrológicas em regiões sem dados *in situ* (Wongchuig et al., 2019; Fassoni-Andrade et al., 2023; Rufino et al., 2023).

Desta forma, a modelagem hidrológica permite suprir o déficit de informações fluviométricas, decorrente da inconsistência das séries históricas disponíveis. E se torna um instrumento importante para a gestão dos recursos hídricos, fornecendo uma solução viável para representar os principais processos hidrológicos e prever regimes de vazões (Ávila et al., 2022).

Para tanto, Mendes (2021) frisa que os modelos disponibilizam grande quantidade de informações, porém não produzem números inquestionáveis, especialmente em bacias com poucos dados de monitoramento. Logo, é necessário realizar a calibração e validação dos parâmetros que descrevem as características hidrológicas da bacia. Sobre isso, Finger et al. (2015) apontam que a calibração e validação, com vários conjuntos de dados, aumentam o desempenho geral dos modelos hidrológicos. Enfatizando, Serrão et al. (2021) citam que na atual conjuntura os modelos calibrados e validados são uma ferramenta importante que podem auxiliar no estabelecimento de uma rede de monitoramento.

Deste modo, o Soil and Water Assessment Tool – SWAT (Ferramenta de Avaliação de Solo e Água) surge como uma alternativa adequada para simulações hidrológicas, pois o modelo combina fatores climáticos, topográficos, edáficos e de uso do solo para avaliar a variação das condições hidrológicas e permite a projeção de uma série de impactos futuros (Tudose et al., 2021), provendo informações para diversas pesquisas e análises (Bressiani et al., 2015).

Segundo Abbaspour et al. (2018) a calibração do SWAT refere-se a um procedimento onde a diferença entre simulação do modelo e observação são minimizadas. Trabalhos recentes têm demonstrado a eficiência da calibração e validação deste modelo (Arnold et al., 2012; Almeida et al., 2018; Andrade et al., 2019; Martins et al., 2020; Bennour et al., 2022; Rufino et al., 2023; Farias et al., 2023), comprovando sua aplicabilidade em diferentes regiões.

Ademais, Ougahi et al. (2022) descrevem que o SWAT é o modelo mais utilizado em estudos ambientais por ser de acesso aberto, promovendo aplicações em uma gama de problemas hidrológicos e/ou ambientais. Dentre esses, pode-se destacar a estimativa da produção de sedimentos (Silva et al., 2017), avaliação do rendimento das culturas agrícolas (Paul et al., 2020), análise de mudanças climáticas e de uso da terra (Serrão et al., 2023), simulação de cenários futuros (Tarekegn et al., 2022) e avaliação de escoamento superficial em áreas inundadas (Suwannachai et al., 2024).

De forma abrangente, o uso generalizado do SWAT em todo o mundo tem apresentado resultados satisfatórios. O modelo tem um excelente desempenho em termos de simulação de gestão da água e planejamento agrícola, sendo capaz, ainda, de modelar áreas com escassez de dados (Gassman et al., 2014; Brighenti et al., 2019). Além de fornecer dados essenciais, o

SWAT possibilita análises futuras, contribuindo para a identificação de tendências, regularização de reservatórios, e a compreensão de cenários de alteração hidrológica devido ao desmatamento.

Nesse contexto, Pará e Mato Grosso foram os estados da Amazônia brasileira com maior taxa histórica de supressão da vegetação nativa, visto que integraram o chamado Arco do Desmatamento (INPE, 2020; Silva Junior. et al., 2021; IMAZON, 2022; MapBiomas, 2024). A Bacia Hidrográfica do rio Teles Pires, localizada entre esses estados tornou-se alvo crescente de interesse econômico, sendo uma das principais regiões de exploração agrícola e pecuária do país, práticas que alteram o regime hidrológico local. Em complemento, Hurtado et al. (2024) enfatizam que a rápida evolução do agronegócio, o aumento populacional e a expansão das atividades industriais resultam em impactos significativos nos recursos hídricos.

Diante do exposto, a pesquisa visa calibrar e validar o modelo SWAT para a Bacia Hidrográfica do rio Teles Pires. A simulação fornecerá subsídios para futuros estudos voltados à definição de estratégias para a gestão da água. Além disso, é possível comprovar a eficiência do modelo para simulação das curvas de permanência.

Material e métodos

Caracterização da Área

A Bacia Hidrográfica do rio Teles Pires (BHTP), também denominado rio São Manoel, está situada entre as regiões norte e centro-oeste do Brasil, nas latitudes 7°16'47" e 14°55'17" S e longitudes 53°49'46" e 58°7'58" W (Figura 1), abrangendo uma área total de 141.278,62 km².

O rio principal possui extensão de 1.481 km, nascendo nas serras Azul e do Finca Faca, a uma altitude média de 800 m e desenvolve-se no sentido SE-NW (EPE, 2009), atravessando o ecótono entre Cerrado (Alto Teles Pires) e Amazônia (Médio e Baixo Teles Pires), onde converge com o rio Juruena, formando o rio Tapajós, seu exutório, no município de Jacareacanga (PA), localidade que engloba o território indígena Munduruku.

De acordo com a classificação de Koppen, a parte norte da bacia é identificada como "Am" (clima tropical de monção) e a porção sul é "Aw" (clima quente com inverno seco), refletindo a diversidade climática influenciada pela transição entre os biomas. Este gradiente ecológico se manifesta também na distribuição espaço-temporal da precipitação, variando de 2500 mm/ano no período chuvoso (outubro a abril) à 1600/ano no período seco (maio a setembro).

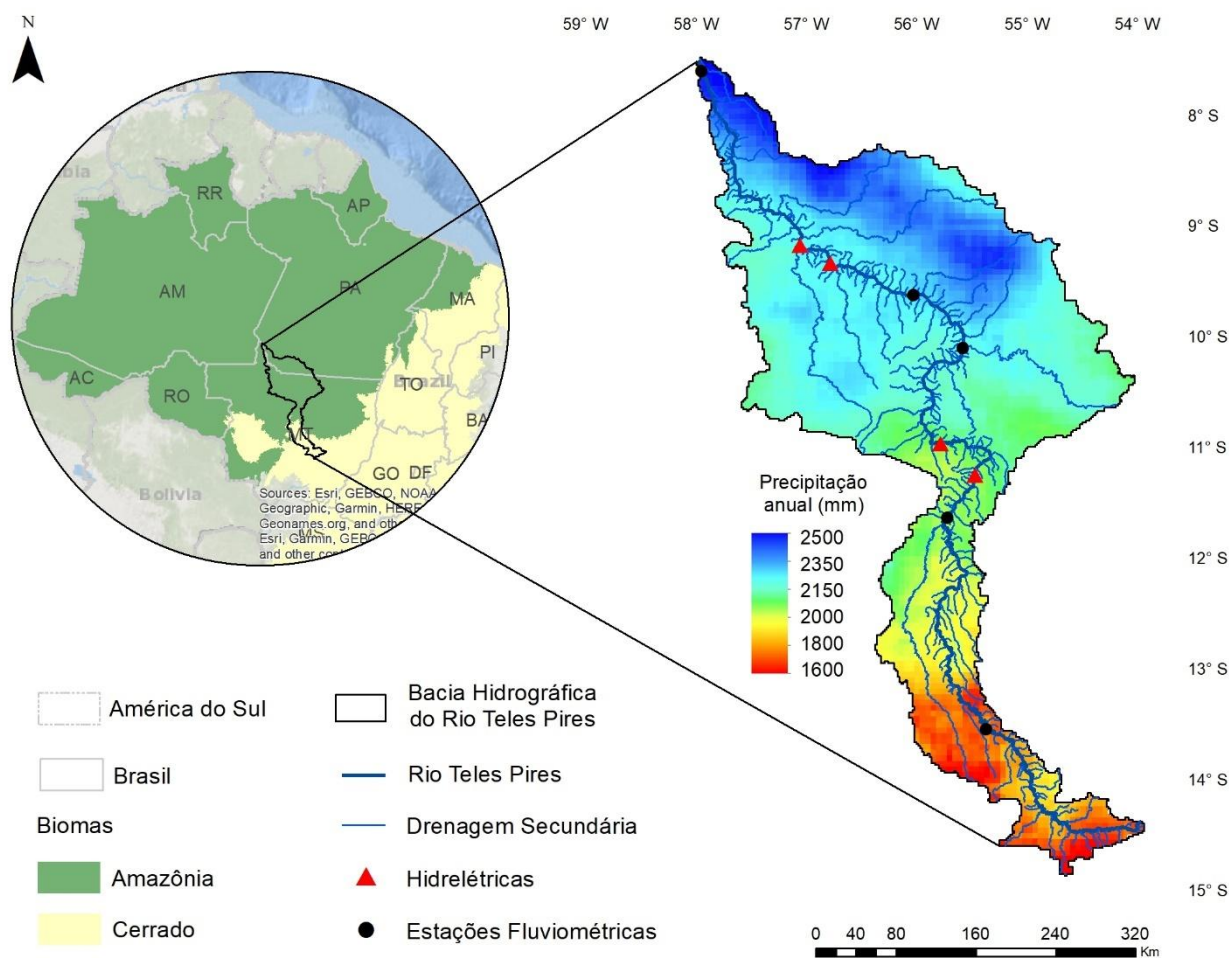


Figura 1. Mapa de localização geográfica da Bacia Hidrográfica do Rio Teles Pires.

O estado do Mato Grosso, onde se concentra a maior parte da BHTP, é uma das principais áreas de avanço da agropecuária no Brasil, resultando em transformações significativas no ambiente. Apesar da importância no contexto nacional e internacional, esta região carece de monitoramento contínuo quanto às mudanças no uso da terra, decorrentes da expansão agrícola promovida por grandes empreendimentos (Zaiatz et al., 2018; Kraeski et al., 2023).

De acordo com Borella et al. (2022) a bacia está enfrentando desafios hídricos significativos devido ao recente crescimento urbano, expansão da agricultura irrigada e a construção de usinas hidrelétricas nas regiões de floresta e cerrado, impactando a disponibilidade de água e a produção de sedimentos.

Na última década, importantes projetos de Usinas Hidrelétricas (UHE) foram implantados na BHTP. Atualmente, quatro UHE estão em operação: Teles Pires (1.820 MW), São Manoel (736 MW), Sinop (462 MW) e Colíder (300 MW). Para Fearnside (2019), as barragens na Amazônia acarretam impactos socioambientais significativos, como a redução de áreas protegidas e a mortandade

de peixes, em função de falhas nos processos de licenciamento.

Modelo SWAT

O SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) é um modelo matemático semi-distribuído desenvolvido no Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) por Arnold et al. (1998) para avaliar os impactos das alterações do uso do solo sobre os recursos hídricos em grandes bacias.

Dentre os processos hidrológicos derivados da simulação, destacam-se o escoamento superficial, evapotranspiração, fluxo de retorno e subterrâneo, percolação, análise de reservatório, produção de sedimentos, aspectos climáticos, crescimento de culturas, nutrientes e pesticidas em práticas agrícolas e aspectos de qualidade da água (Neitsch et al., 2011; Silva et al., 2017; Priya e Manjula, 2021; Serrão et al., 2023).

O SWAT é baseado nos processos físicos que ocorrem em uma bacia, podendo operar em escalas de tempo diárias e mensais (Arnold et al. 2012). A determinação do balanço hídrico é fundamentada pela Equação 1, representando a fase terrestre do ciclo hidrológico.

$$SW_r = SW_0 + \sum_{t=1}^t (P - Q_{surf} - ET - W_{perc} - S_{sub}) \quad (1)$$

Em que: SW_t : conteúdo final de água no solo (mm); SW_0 : conteúdo de água no solo disponível para as plantas, sendo a diferença entre a umidade de capacidade de campo e o ponto de murcha permanente (mm); t : tempo (dias); P : precipitação (mm); Q_{surf} : escoamento superficial (mm); ET : evapotranspiração (mm); W_{perc} : percolação (mm), e Q_{sub} : fluxo de retorno (mm).

Posteriormente, ocorre a simulação dos processos da fase de propagação da água através dos canais (Neitsch et al., 2011). O roteamento do escoamento no canal é especificado usando o método de Muskingum (baseado nas equações da continuidade e de armazenamento linear empírico), descrito por Cunge (1969) e Williams (1969), conforme a Equação 2.

$$c_k = \frac{5}{3} \left(\frac{RH^{2/3} \cdot i^{1/2}}{n} \right) = \frac{5}{3} v_c \quad (2)$$

Em que: c_k : celeridade (m/s); RH : raio hidráulico para dada profundidade (m); i : declividade ao longo do comprimento do canal (m/m); n : coeficiente de rugosidade de Manning, e v_c : velocidade do fluxo (m/s).

O SWAT trabalha integrado ao Sistema de Informação Geográfica (SIG). Os dados de entrada (bancos cartográficos, camadas de dados e dados tabulares) foram inseridos utilizando a interface ArcSWAT2012.10_8.26 acoplado ao ArcGIS, versão 10.8.2.

Unidades de Respostas Hidrológicas

De acordo com a FAO (2025) o SWAT usa um esquema de desagregação de dois níveis para a formação das *Hydrological Response Units* (HRU), identificando as sub-bacias com base em critérios topográficos, seguida pela discretização considerando o tipo de solo e uso da terra.

A área é o único atributo espacial de interesse do modelo para composição da HRU, pois determinará a quantidade de água precipitada para cada HRU. A criação de HRU é, portanto, baseada na contagem de células, uma vez que a contagem multiplicada pela área da célula da grade fornece a área da HRU (Dile et al., 2016).

Assim, os processos hidrológicos, como armazenamento de água subterrânea e descarga de água subterrânea para córregos são computados para cada HRU (Molina-Navarro et al., 2019).

Como resultado, foram geradas 25 sub-bacias (Figura 2A) e 90 HRU, com base nas características homogêneas das variáveis citadas.

Modelo Digital de Elevação

O produto de dados em grade do HydroSHEDS foi utilizado para projetar o Modelo Digital de Elevação (MDE). O conjunto de camadas incluem uma versão hidrologicamente condicionada do MDE, redes fluviais e lagos, grades de direção de fluxo e acumulação de fluxo, disponíveis gratuitamente no formato SIG em: <https://www.hydrosheds.org/products>

O MDE possui resolução espacial de 3 arc-seconds (90 m), baseado no modelo SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), em formato raster, e foi projetado no sistema de coordenadas Universal Transverse Mercator (UTM), referência SIRGAS 2000 – Zona 21S, exibindo amplitude topográfica de 98 m à 871 m (Figura 2B).

Tipos de Solo

A classificação e mapeamento dos tipos de solos foram obtidos a partir do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2018), organizados em dados tabulares. A distribuição espacial de cada tipo de solo presente na BHTP (Figura 2C) corresponde à: Neossolo Quartzarênico (NFV - 42,48%), Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico (PVA - 28,11%), Latossolo Vermelho-Amarelo (LAD - 28,13%) e Afloramento de Rochas (AFR - 0,13%).

O SWAT demanda, ainda, as características pedológicas do solo, como: Número de camadas (NLAYER); Grupo hidrológico (HYDGRP); Profundidade máxima (SOL_ZMX); Porosidade (ANION_EXCL); Densidade (SOL_BD); Água disponível (SOL_AWC); Condutividade hidráulica (SOL_K); Carbono orgânico (SOL_CBN); Argila (CLAY); Silte (SILT); Areia (SAND); Pedras (ROCK); Albedo (SOL_ALB); Erodibilidade (USLE_K); e Condutividade Elétrica (SOL_EC), dispostas na Tabela 1, adquiridas com base em estudos de Silva, 2016, Mingoti et al., 2016 e Lopes et al., 2021.

Tabela 1. Características dos tipos de solo presentes na Bacia Hidrográfica do rio Teles Pires.

Parâmetro Pedológico	TIPO DE SOLO			
	LAD	NFV	PVA	AFR
NLAYERS	3	3	3	1
HYDGRP	B	D	C	D
SOL_ZMX	3300	3300	3300	1000
ANION_EXCL	0,5	0,5	0,5	0,5
SOL_BD	1,59	1,36	1,56	1,1
SOL_AWC	0,1	0,1	0,1	0,1
SOL_K	24,12	5,76	51,65	1,98
SOL_CBN	0,87	2,99	1,17	0,53
CLAY	17,7	36,35	11,5	67
SILT	9,15	37,1	6,5	30,3
SAND	73,15	29,55	82	2,7
ROCK	1	1	1	98
SOL_ALB	0,25	0,08	0,25	0,25
USLE_K	0,13	0,13	0,09	0,27
SOL_EC	1	1	1	3

Uso e Cobertura da Terra

Utilizou-se a coleção de mapas anuais de Uso e Cobertura da Terra (*Land Use and Land Cover - LULC*) fornecidos pelo MapBiomas, por

meio da Coleção 9.0, em escala de 30 metros. É importante atentar para os seguintes aspectos: A cobertura da terra refere-se às características da superfície da Terra, enquanto o uso da terra está ligado às interações humanas com as superfícies terrestres (Martínez e Mollicone, 2012).

O acesso aos arquivos de imagens Landsat é aberto operados através da plataforma de computação em nuvem do Google Earth Engine, que atua com algoritmos de linguagem de programação JavaScript. O método de classificação do MapBiomas é um sistema hierárquico com uma combinação de classes compatível com os sistemas de classificação do IBGE (2013) e FAO (2016).

Para caracterizar o LULC da BHTP (Figura 2D), foi inserido o mapa do ano de 2023 no SWAT, identificando os usos predominantes de Floresta (47,95%), Pastagem (22,77%) e Agricultura (16,93%), seguidos por Cerrado (5,78%), Planícies de Inundação (4,42%), Rios (0,97%), Área Urbanizada (0,61%), Mineração (0,39%) e Afloramento Rochoso (0,18%).

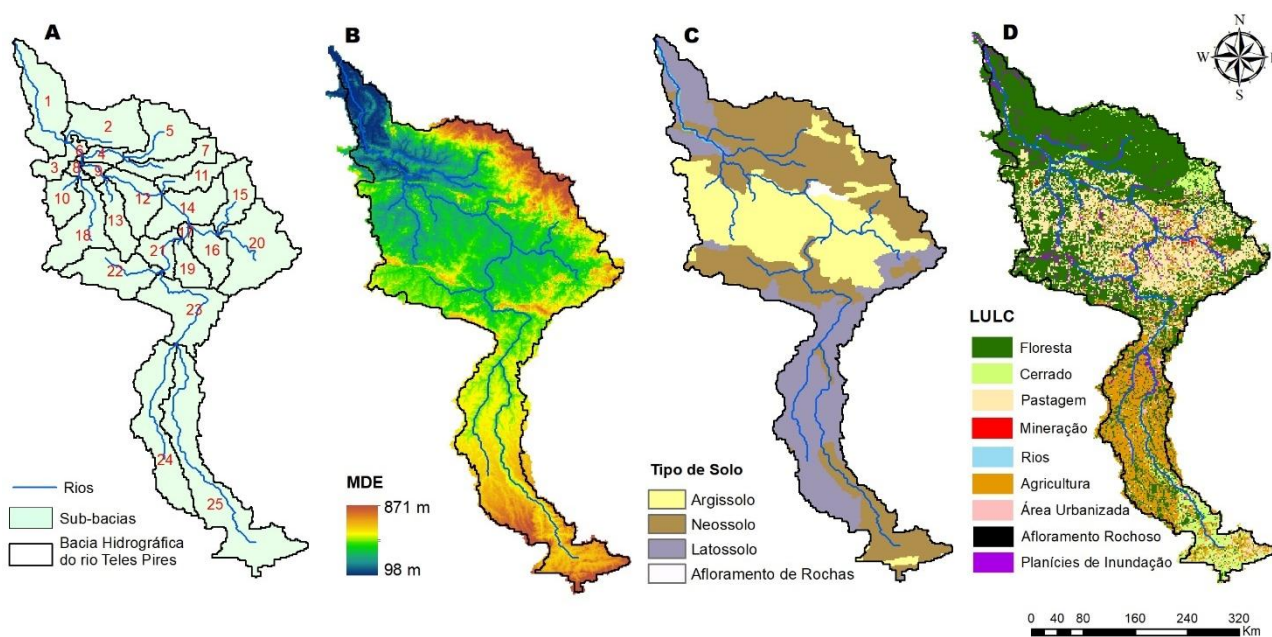


Figura 2. Distribuição espacial de A) Sub-bacias geradas pelo modelo SWAT; B) Modelo Digital de Elevação; C) Tipos de Solo; e D) Uso e Cobertura da Terra na Bacia Hidrográfica do Rio Teles Pires.

Dados Climáticos

Os parâmetros climáticos fundamentais para executar o SWAT incluem: Precipitação (mm/d), temperatura (°C/d), velocidade do vento (m/s/d), temperatura do ponto de orvalho (°C), radiação solar (MJ/m²/d) e umidade relativa (g/m³/d). Estes foram obtidos a partir de duas estações meteorológicas convencionais disponíveis na área do estudo, ambas administradas pelo

Ataide, L. C. P., Pessoa, F. C. L., Serrão, E. A. O.

Instituto Nacional de Meteorologia (INMET): Estação Itaituba (PA), representando o clima do baixo Teles Pires, e a estação Gleba Celeste (MT) caracterizando o médio e alto Teles Pires. Para complementar o banco de dados meteorológicos, o SWAT utiliza o módulo WXGEN, um gerador do estado atmosférico do clima, com base nos dados registrados (Sharpley e Williams, 1990).

A precipitação é a principal variável de entrada dos modelos hidrológicos, pois influencia diretamente na simulação do escoamento e do balanço hídrico da bacia hidrográfica. Em decorrência da baixa cobertura da rede de monitoramento, foi incluído o conjunto de dados de precipitação diária do Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Stations (CHIRPS). O algoritmo possui resolução espacial de 0,05° (~5,3 km) e incorpora as estimativas de precipitação obtidas por satélites infravermelhos, combinados com dados de estações meteorológicas para representar locais medidos espaçadamente, de 1981 até o presente (Serrão et al., 2025).

Segundo Rasheed et al. (2024), o CHIRPS produz estimativas de precipitação adequadas para a simulação do fluxo de água em condições de dados medidos insuficientes. O produto foi previamente avaliado e validado, apresentando ótimo desempenho na representação da precipitação da Amazônia brasileira e Cerrado (Costa et al., 2019; Cavalcante et al., 2020; de Oliveira-Júnior et al., 2021).

Dados Hidrométricos

A calibração e validação das simulações do modelo foram realizadas com base nas médias mensais de vazão, obtidas a partir de estações fluviométricas (Tabela 2) disponíveis no portal HidroWeb, integrante do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Para a seleção das estações, adotou-se como critério um período mínimo de observação de 30 anos.

Além disso, a modelagem requer de informações sobre as hidrelétricas presentes na bacia. Das quatro UHE em operação, foram consideradas no estudo as três de maior capacidade instalada. Essas usinas operam em regime a fio d'água, logo, a geração de energia depende diretamente da vazão afluente, que varia ao longo do ano. Dessa forma, o SWAT solicita as séries históricas das vazões afluente, defluente, vertida e turbinada dos reservatórios (Tabela 2), fornecidas no Sistema de Acompanhamento de Reservatórios (SAR), também gerenciado pela ANA.

Tabela 2. Informações das estações fluviométricas e reservatórios da Bacia Hidrográfica do rio Teles Pires.

Dados das Estações Fluviométricas					
Nome	Código	Período	Latitude	Longitude	Sub-bacia
Três Marias	17420000	1976 - 2021	-7.62	-57.95	1
Peixoto de Azevedo	17380000	1981 - 2021	-9.64	-56.02	12
Indeco	17340000	1976 - 2020	-10.11	-55.57	17
Cachoeirão	17280000	1976 - 2019	-11.65	-55.70	23
Porto Roncador	17200000	1974 - 2021	-13.56	-55.34	25
Dados dos Reservatórios					
UHE	Início da Operação	Cota (m)	Área de Inundação (km²)	Volume Máx. (m³)	Sub-bacia
São Manoel	2018	161,44	66,00	577.220.000	6
Teles Pires	2015	220,44	95,00	960.000.000	9
Sinop	2019	302,00	342,00	3.000.000.000	23

Análise de Sensibilidade e Calibração

A calibração foi realizada por meio do software SWAT-CUP (Calibration and Uncertainty Procedures), versão 5.2.1.1 - 2019, aplicando o algoritmo Sequential Uncertainty Fitting (SUFI-2), utilizado para calibração, validação, análise de sensibilidade e incerteza. No SUFI-2, a incerteza dos parâmetros de entrada é descrita como uma distribuição uniforme, enquanto a incerteza de saída é quantificada na previsão de 95% (95PPU). Este intervalo de confiança é calculado nos níveis de 2,5% e 97,5% da distribuição cumulativa de variáveis de saída por meio do método de amostragem do hipercubo

latino (Abbaspour et al., 2015; Nunes et al., 2020).

A análise de sensibilidade constitui uma etapa preliminar à calibração e à validação do modelo SWAT e consiste em identificar quais parâmetros possuem maior impacto sobre as simulações, através das mudanças na regressão múltipla a partir das variáveis de entrada, na qual as sensibilidades correspondem às mudanças na média da função objetivo derivadas de mudanças em cada parâmetro (Song et al., 2015; Rufino et al., 2023). A cada interação, o SWAT-CUP fornece ao usuário novos intervalos para os parâmetros selecionados, geralmente mais precisos que na

interação anterior, visando reduzir a incerteza e aprimorar o desempenho do modelo.

Os parâmetros são classificados com base no resultado do teste t e valor p. O programa utiliza o teste t para medir a significância de cada parâmetro; quanto maior o valor absoluto, mais sensível será o parâmetro (Serrão et al., 2021). Deste modo, os parâmetros mais sensíveis da bacia são ajustados até que as respostas se aproximem dos valores observados. A qualidade do ajuste pode ser quantificada por dois índices: “fator P” e “fator R” (Abbaspour et al., 2015; Andrade et al., 2019). O fator P representa a porcentagem de dados observados no intervalo de confiança de predição do modelo de 95% (95PPU). O fator R mede o intervalo de confiança médio da faixa 95PPU, variando de 0 à 1,5. Um fator P maior pode ser alcançado devido à um fator R maior, sendo necessário alcançar o equilíbrio entre os dois.

As simulações hidrológicas foram realizadas para o período de 1983 a 2020, em que os três primeiros anos das séries de dados de vazão disponíveis foram usados para o período de spin-up (aquecimento), ou seja, de 1983 a 1985. Os processos de calibração (1986 a 2005) e validação (2006 a 2020) ocorreram no passo de tempo mensal, começando pelas estações fluviométricas a montante e seguindo para a estação localizada próximo ao exutório (Três Marias), com um total de cinco estações calibradas e validadas ao longo da Bacia Hidrográfica do rio Teles Pires.

Desempenho Estatístico

A acuraria do SWAT foi testado entre a vazão simulada (Q_{sim}) e vazão observada (Q_{obs}) foi verificada através dos índices estatísticos recomendados por Moriasi et al. (2007) e Abbaspour et al. (2018).

O coeficiente de determinação (R^2) (Equação 3) é uma medida da força da correlação linear entre os valores simulados e observados. Varia entre 0 e 1, expresso em percentuais.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum (Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (3)$$

O Nash e Sutcliffe (1970), Equação 4, é uma métrica de eficiência normalizada que representa a mudança nos dados de magnitude relativa em comparação com os dados de variância medidos, o resultado varia de $-\infty$ a 1.

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (4)$$

O coeficiente NS_{log} é a eficiência NS aplicado aos logaritmos, o qual é mais sensível às vazões mínimas. Este índice é limitado em 1, representando as melhores previsões, Equação 5.

$$NS_{log} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \log(Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum_{i=1}^n \log(Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (5)$$

O Percent BIAS (PBIAS), Equação 6, indica a tendência média das vazões simuladas serem maiores ou menores do que a vazão observada. Valores negativos indicam superestimação (Gupta et al., 1999).

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim})}{\sum_{i=1}^n Q_{obs}} \cdot 100 \quad (6)$$

A Eficiência Kling-Gupta (KGE) combina três métricas estatísticas: coeficiente de correlação, razão de variabilidade e razão de viés, para avaliar as vazões máximas. Em que 1 indica concordância perfeita, calculado conforme a Equação 7.

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + \left(\frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{obs}} - 1\right)^2 + \left(\frac{\mu_{sim}}{\mu_{obs}} - 1\right)^2} \quad (7)$$

Resultados e discussão

Análise de Sensibilidade

Para realizar a análise de sensibilidade, foram selecionados 16 parâmetros ajustáveis, considerando seus intervalos mínimos e máximos absolutos. A escolha dos parâmetros foi baseada nas saídas iniciais do modelo e nos protocolos de calibração para modelos distribuídos em larga escala sugeridos por Abbaspour (2015). Os métodos de alteração de parâmetros usados foram o Replace (V) que substitui o valor existente pelo valor fornecido, e o *Relative* (r) que multiplica o valor existente por 1+ o valor fornecido.

Para cada interação, foram definidos um total de 500 simulações. A cada interação, as tendências dos parâmetros eram analisadas em função da otimização dos valores estatísticos e a redução da incerteza associada à calibração. Após a execução de 15 interações, nenhuma melhoria adicional nos resultados da função objetivo foi observada. Assim, os 16 parâmetros foram ajustados na simulação nº 44 da interação 15, demonstrando os melhores resultados através do *t-start* e *p-value*. (Tabela 3).

Tabela 3. Descrição dos parâmetros sensíveis do modelo SWAT incluídos na calibração final.

Parâmetro	Descrição	Intervalo	Ajuste	t-stat	p-value
CN2	Número inicial da curva de escoamento do SCS para condição de umidade II	-0,3 - 0,3	0,22	-0,09	0,93
ALPHA_BF	Constante de recessão do fluxo de base (dia)	0 - 1	0,49	0,04	0,97
GW_DELAY	Tempo de atraso das águas subterrâneas (dias)	30 - 450	311,40	0,11	0,91
SOL_AWC	Capacidade de água disponível da camada do solo (mm H ₂ O/mm solo)	0 - 1	0,77	-1,93	0,06
ESCO	Coefficiente de compensação de evaporação do solo	0 - 1	0,43	5,87	0,00
CANMX	Armazenamento máximo do dossel (mm H ₂ O)	0 - 100	45,00	-0,53	0,60
ALPHA_BNK	Constante de proporcionalidade (dias)	0 - 1	0,95	0,16	0,87
GWQMN	Profundidade limite de água no aquífero raso necessária para que ocorra o fluxo de retorno (mm H ₂ O)	0 - 2	1,90	0,29	0,77
REVAPMN	Profundidade limite da água no aquífero raso para que ocorra a “revap” ou percolação para o aquífero profundo (mm H ₂ O)	0 - 500	485,00	2,07	0,05
SHALLST	Profundidade inicial da água no aquífero raso (mm)	0 - 5000	2750,00	1,07	0,29
LAT_TTIME	Tempo de atraso do escoamento lateral (dias)	0 - 180	34,20	-1,18	0,25
GWHT	Altura inicial da água subterrânea (m)	4 - 10	8,62	-0,75	0,46
CH_N2	Coefficiente de rugosidade de Manning (n) para o canal	5 - 130	78,75	-0,29	0,77
SLSUBBSN	Comprimento médio do talude (m)	10 - 150	11,40	-3,61	0,00
HRU_SLP	Declividade média do terreno (m/m)	0 - 1	0,93	-0,53	0,60
OV_N	Valor 'n' de Manning para escoamento superficial	0,01 - 10	5,90	-0,18	0,86

A sensibilidade dos parâmetros está relacionada aos fatores físicos dos dados de entrada do modelo, logo, ao realizar o ajuste dos mesmos, é garantido o sucesso da calibração. Quanto maior o valor absoluto do *t-stat*, maior a sensibilidade do parâmetro, enquanto um valor de *p* mais próximo de zero tem mais significância (Silva et al., 2018; Bennour et al., 2022).

Portanto, a análise de sensibilidade global demonstrou que os parâmetros mais sensíveis à calibração do modelo são ESCO, SLSUBBSN e LAT_TTIME que estão associados às Unidades de Respostas Hidrológicas, influenciando no processo hidrológico do escoamento superficial, através da evaporação do solo, tempo e declividade do escoamento. Além de SOL_AWC, REVAPMN e SHALLST que estão condicionados às águas subterrâneas e consequentemente ao escoamento de base. Considerando o conjunto de fatores hidrológicos, os seis parâmetros respondem à sazonalidade das chuvas na bacia e à diversidade da topografia, solos e uso da terra, afetando a dinâmica de recarga do aquífero.

Aplicando o SWAT-CUP para uma bacia inserida no bioma Cerrado, Silva et al. (2018) destacaram GW_REVAP, GW_DELAY, GWQMN e SOL_AWC como os parâmetros mais sensíveis, os quais representam as águas subterrâneas. Ao calibrar o modelo para o Alto Teles Pires, Lopes et al. (2021) também evidenciaram a relação dos processos subterrâneos

na calibração, através de GW_DELAY, SOL_BD, CH_K2, CH_N2 GWQMN e SURLAG relacionados ao tempo do escoamento subterrâneo, densidade do solo, condutividade hidráulica, profundidade do lençol freático e coeficiente de rugosidade de Manning.

Dentre os parâmetros descritos pelos autores supracitados, GW_DELAY, GWQMN e CH_N2 integraram a presente pesquisa, embora com menor significância. Esse resultado pode ser atribuído ao fato de que GW_DELAY está associado à extensão territorial da bacia, enquanto GWQMN está intrinsecamente relacionado às propriedades de uso e ocupação do solo. O CH_N2, por sua vez, está atrelada às características físicas do canal e da bacia, tais como sinuosidade, profundidade, uso da terra e cobertura vegetal. Esses fatores refletem o grau de resposta do modelo às variações do parâmetro dentro do contexto físico da bacia. Uma vez que, parâmetros que são altamente sensíveis em determinadas bacias podem apresentar menor influência em outras, em função das especificidades locais, sem que isso implique na perda de relevância hidrológica.

Em consonância com os resultados obtidos, Pereira et al. (2016) concluíram que os parâmetros relacionados à água no solo (SOL_AWC, SOL_K, SOL_AWC) foram os mais sensíveis e importantes na calibração de uma bacia localizada no Cerrado de São Paulo, enquanto os parâmetros referentes aos aquíferos (GW_DELAY

e GWQMN) foram menos sensíveis. Dos Santos et al. (2018) e Rufino et al. (2023) observaram que o CH_N2 pode influenciar a calibração de bacias amazônicas situadas na transição Amazônia-Cerrado, diante da elevada densidade de vegetação nos canais fluviais, ainda que esse parâmetro apresente menor aplicabilidade em calibrações de rios com baixa declividade, típicos da Amazônia.

De modo geral, todas as análises executadas para o Cerrado comprovaram que as características de solo impactam na produção de água subterrânea e interferem nos resultados de saída do SWAT. De acordo com Sena et al. (2021), um dos principais aspectos físicos dos solos do Cerrado são a sua elevada profundidade e porosidade, o que proporciona alta capacidade de infiltração da água, porém com uma limitada capacidade de armazenamento. Assim, o manejo inadequado desse atributo, decorrente das intensivas alterações de uso da terra, ocasionam a degradação e redução na qualidade física-hídricas, tornando a simulação mais desafiadora.

Em relação aos parâmetros menos sensíveis, CN2 e ALPHA_BF apresentaram *p-value* > 0,05 e baixos valores de *t*, indicando indica que variações nesses parâmetros não afetam fortemente a saída do modelo. No entanto, o CN2

exerceu forte influência nas primeiras interações da calibração, enquanto, à medida que seu intervalo foi ajustado, sua significância reduziu. O mesmo foi verificado por Lopes et al. (2021) ao relatar que os parâmetros relacionados à geração de fluxo têm um baixo grau de sensibilidade. Todavia, em estudos conduzido por Rufino et al. (2023) para Bacia Hidrográfica do Rio Jari, Andrade et al. (2019) para uma bacia rural no Nordeste do Brasil e Nunes et al. (2020) para o Distrito Federal, o CN2 foi o mais relevante, enfatizando que a significância do parâmetro está atrelada as características fisiográficas da bacia.

Calibração e Validação

Com a ferramenta *Edit SWAT Input*, os parâmetros ajustados foram inseridos no modelo para otimizar a simulação. Após o procedimento de calibração, a comparação entre os hidrogramas simulados e observados para cada sub-bacia analisada foi essencial para avaliar a performance estatística do modelo (Tabela 4). A análise das simulações revela que o SWAT foi capaz de rastrear as tendências sazonais das vazões mensais para a BHTP de forma satisfatória, demonstrando consistência mesmo com dados escassos.

Tabela 4. Índices estatísticos de performance do modelo SWAT para as sub-bacias analisadas.

	Sub 25		Sub 23		Sub 17		Sub 12		Sub 1	
	Calib.	Valid.	Calib.	Valid.	Calib.	Valid.	Calib.	Valid.	Calib.	Valid.
<i>p-factor</i>	0.38	0.9	0.62	0.9	0.58	0.83	0.67	0.9	0.66	0.83
<i>r-factor</i>	0.68	1.86	0.64	1.9	0.52	1.53	0.48	1.37	0.46	1.23
R	0.920	0.886	0.948	0.915	0.961	0.918	0.942	0.956	0.938	0.923
R²	0.847	0.785	0.898	0.838	0.924	0.844	0.887	0.915	0.881	0.853
NS	0.688	0.448	0.986	0.953	0.990	0.979	0.952	0.965	0.990	0.984
BIAS	55.61	73.92	11.91	21.48	9.73	14.41	21.88	18.60	9.71	12.41
KGE	0.282	0.0703	0.369	0.252	0.582	0.645	0.671	0.675	0.846	0.849
Nslog	0.993	0.989	0.999	0.998	1.000	0.999	0.999	0.999	1.000	0.999

Para a sub-bacia 25 (Estação Porto Roncador), localizada na nascente da BHTP, verificou-se um leve deslocamento do hidrograma para a direita (Figura 3). O modelo SWAT apresentou forte correspondência entre as vazões simuladas e observadas, especialmente no fluxo de base, como evidenciado pelos altos valores de Nslog 0,993 na calibração e 0,989 na validação (Tabela 4). No entanto, essa sub-bacia registrou os maiores valores de BIAS (55,61 na calibração e 73,92 na validação), indicando uma superestimação significativa das vazões, principalmente nos anos de 2004 e 2013. Além

disso, o KGE foi baixo (0,282 na calibração e 0,0703 na validação), refletindo limitações na reprodução da série observada, evidenciada no NS da validação (0,448), sugerindo uma menor precisão na estimativa das vazões ao longo do período analisado. Contudo, os índices KGE e NS são utilizados para avaliar, respectivamente, as vazões máximas e médias. E como a sub-bacia 25 está a montante, o fluxo ainda é reduzido, o que pode dificultar sua representação estatística.

A sub-bacia 23 (Estação Cachoeirão) apresentou um ajuste preciso, conforme indicado pelo coeficiente de determinação R², com o modelo

explicando 89,8% da variância na calibração e 83,8% na validação, demonstrando alta confiabilidade. O desempenho foi excelente, com NS de 0,986 na calibração e 0,953 na validação, evidenciando a capacidade do modelo em capturar os padrões sazonais. No entanto, observou-se uma leve superestimação dos picos de cheia, o que está alinhado com os valores positivos de PBIAS (11,91 na calibração e 21,48 na validação). Por outro lado, os altos valores de NSlog (0,999 na calibração e 0,998 na validação), indicam que o modelo

representa com precisão o fluxo de base durante os períodos de estiagem, conforme Figura 3.

A mesma configuração foi observada por Lopes et al. (2021), com base nos resultados de PBIAS, os autores concluíram que os dados de vazão mensal foram subestimados para Cachoeirão e superestimados para Porto Roncador. Em geral, boas calibrações e validações são alcançadas quando a série de dados usada para calibrar e validar o modelo incluiu anos secos e chuvosos dentro da região (Andrade et al., 2019).

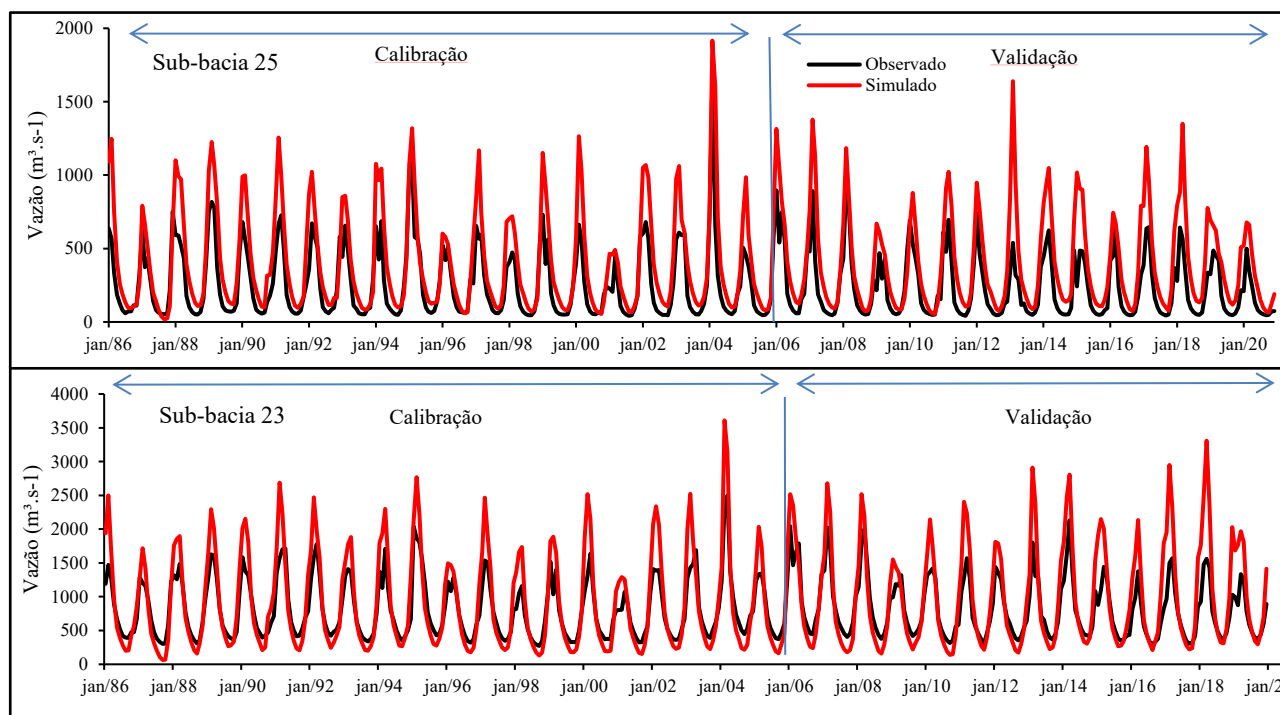


Figura 3. Hidrogramas de vazão observada e simulada para as sub-bacias localizadas no Alto Teles Pires.

As métricas de desempenho para as sub-bacias localizadas na região do médio Teles Pires (Figura 4) comprovaram a eficiência do SWAT. Os resultados de R^2 e NS, próximos de 1, descrevem um ajuste excelente, reforçando a precisão da modelagem, para as sub-bacias 17 e 12. Ainda assim, os valores positivos de BIAS (Tabela 4) para calibração e validação, representa uma leve superestimação, mas dentro de um limite razoável para ambas as sub-bacias.

A superestimação das cheias pode estar relacionada, principalmente, à incerteza do parâmetro CN2, utilizado para estimar o escoamento superficial direto decorrente da precipitação na bacia do rio Teles Pires. O CN2 considera a composição do solo e o tipo de cobertura na sua formulação, logo a contribuição da vazão subterrânea (SOL_AWC) é influenciada pela infiltração na camada superior do solo (SHALLST), percolação e consequente aumento do nível do aquífero (REVAPMN). Assim, a

interação entre esses fatores pode impactar a simulação das vazões extremas no modelo, devido à complexidade de mensurar com exatidão os processos hidrológicos em uma bacia.

O NSlog da sub-bacia 17 (1 na calibração e 0,999 na validação) denota uma representação quase perfeita dos fluxos de base, apesar de certa assimetria no final da série (2018-2020). Enquanto o KGE da sub-bacia 12 (0,671 na calibração e 0,675 na validação), caracteriza o melhor desempenho geral entre todas as sub-bacias para este índice, conforme Figura 6, indicando excelente equilíbrio entre correlação, viés e variabilidade.

Em síntese, a eficiência geral do modelo é muito boa, mas com pequenas discrepâncias nos extremos. De acordo, com Arnold et al. (2012) uma boa correspondência entre outras saídas do modelo e dados medidos (ex.: evapotranspiração e vazão de base) pode aumentar a confiança na calibração. Todavia, o problema da representatividade pode ser minimizado, mas não totalmente resolvido, uma

vez que limitação de dados de medição dificulta a aplicação dessa estratégia.

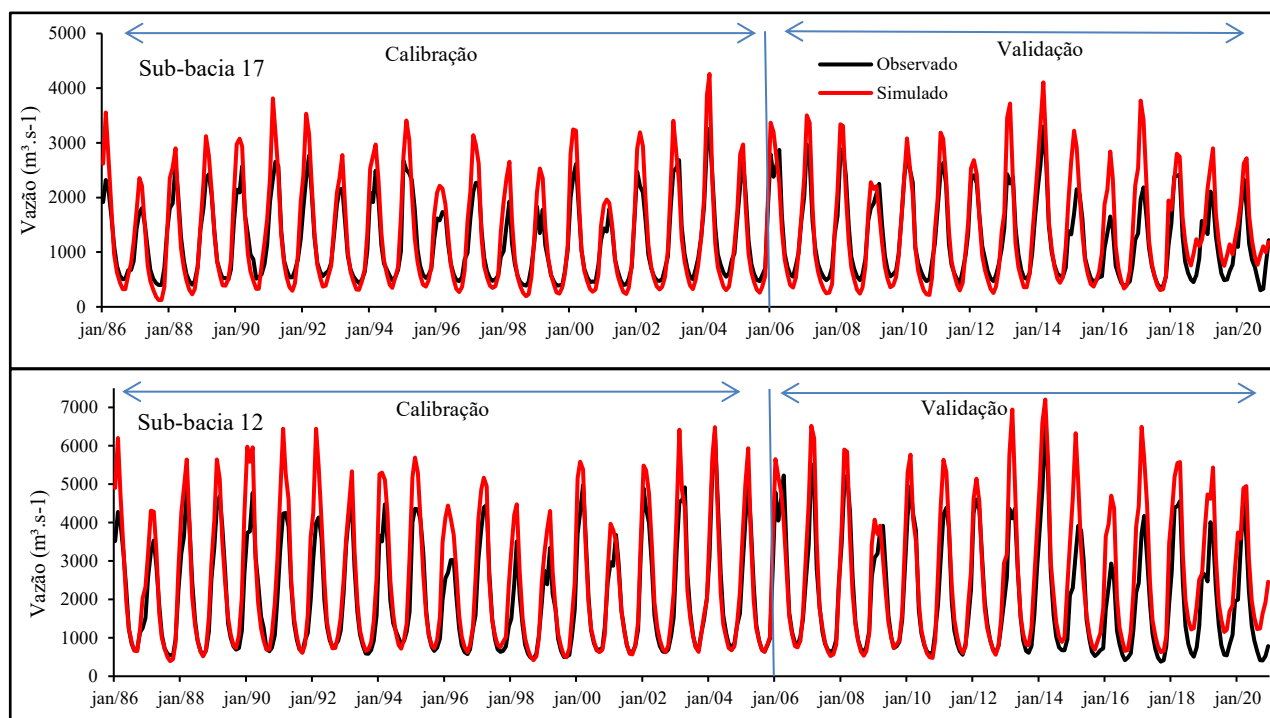


Figura 4. Hidrogramas de vazão observada e simulada para as sub-bacias localizadas no Médio Teles Pires.

A calibração usando o SWAT permite o desenvolvimento de inúmeros estudos e análises ambientais em grande escala. O modelo foi calibrado para a bacia do Rio Xingu por Louzada e Ribeiro (2019) verificando a correspondência satisfatória aos dados observados, proporcionando a compreensão dos processos hidrológicos. Ferreira et al. (2021) simularam adequadamente a evapotranspiração em uma bacia hidrográfica com predominância do bioma Cerrado brasileiro, localizada no Distrito Federal. Após calibrar e validar o modelo, Guilhen et al. (2021) utilizou o SWAT para avaliar o funcionamento hidrológico

da Bacia do rio Madeira sobre suas planícies de inundação aluviais em escalas local e global.

Por fim, a Figura 5 apresenta os hidrogramas da sub-bacia 1 (Estação Três Marias), correspondente ao exutório, para o qual converge toda a vazão afluyente da Bacia Hidrográfica do rio Teles Pires, tornando-a a sub-bacia mais relevante no contexto da análise dos indicadores da qualidade do ajuste. Os resultados mostraram um desempenho consistente nas fases de calibração e validação, com valores elevados de R^2 , NS, NSlog e KGE (Tabela 4), compreendendo o melhor equilíbrio geral entre todas as métricas, retratado na representação das variações sazonais.

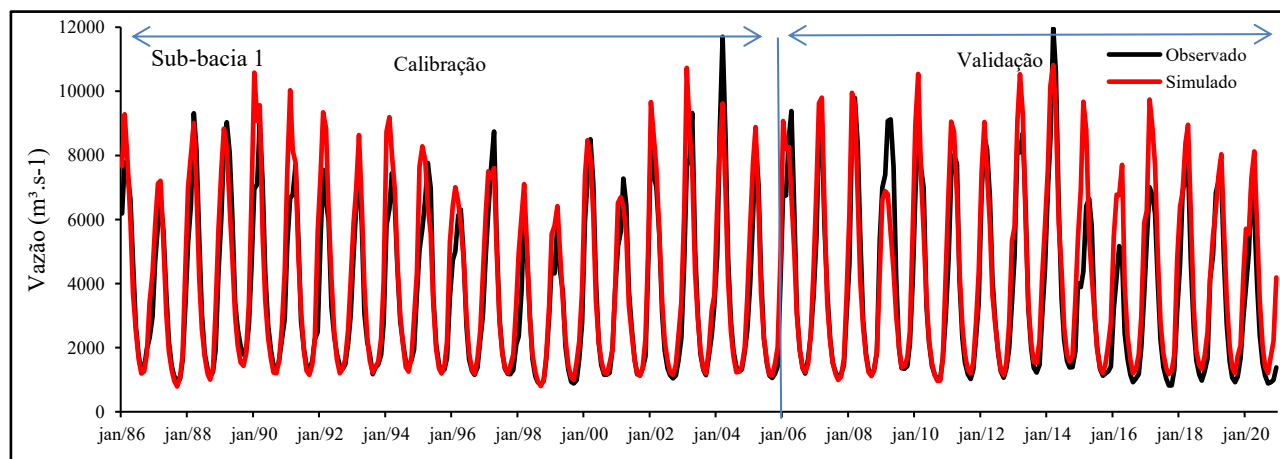


Figura 5. Hidrogramas de vazão observados e simulados para a sub-bacia localizada no Baixo Teles Pires.

Verifica-se excelente correspondência entre a maioria dos picos de vazão e fluxos de base (Figura 5), confirmando que o modelo assimilou perfeitamente os dados observados. Diante do analisado, a simulação comprova a capacidade do SWAT de representar processos hidrológicos em bacias que sofreram mudanças no uso da terra ao longo dos anos. Sobre isso, Zeilhofer et al. (2018) constaram a magnitude dos impactos do desmatamento sobre o escoamento superficial na bacia do Alto Teles Pires, encontrando uma relação positiva ($p < 0,05$) entre escoamento e desmatamento.

O uso da estatística na análise dos dados é essencial para compreender e confirmar a acurácia do modelo. As métricas estatísticas utilizadas estão detalhadas na Figura 6. Observou-se que os índices

de desempenho melhoraram à medida que as estações se aproximavam da foz, ou seja, de montante para jusante, o que pode ser exemplificado pelo aumento do volume de água em cada trecho do rio.

A comparação entre os valores obtidos na nascente (sub-bacia 25) e na saída da BHTP (sub-bacia 1) evidencia a capacidade de previsão do SWAT, uma vez que a performance do modelo apresentou uma melhoria significativa. Esse bom desempenho é resultado do processo de calibração e foi confirmado no período de validação. Segundo Tamm et al. (2018), flutuações relativamente pequenas nos valores de PBIAS indicam que o balanço hídrico foi modelado adequadamente, sendo essa uma das recomendações para futuras avaliações de impacto.

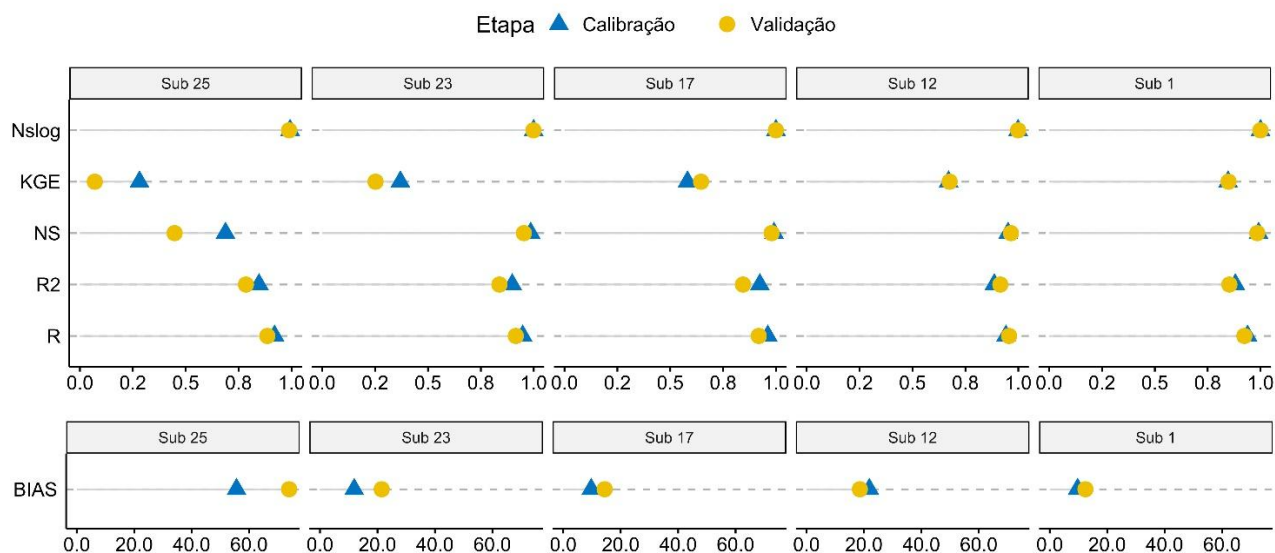


Figura 6. Métricas estatísticas de desempenho para as etapas de calibração e validação do SWAT na Bacia Hidrográfica do rio Teles Pires.

Tucci (2005) enfatiza que os modelos hidrológicos são ferramentas fundamentais para representar os fenômenos que ocorrem em uma bacia hidrográfica, permitindo a análise e a previsão do comportamento hidrológico em diferentes condições ambientais e de uso do solo. Outra análise relacionada à calibração e à validação do modelo é apresentada por Blainski et al. (2017) e diz respeito à capacidade de gerar séries de dados confiáveis destinadas à elaboração de curvas de permanência.

Essas curvas são úteis para avaliar a segurança hídrica, os reflexos de mudanças no ecossistema e a precisão do modelo. A análise das curvas de permanência, em conjunto com o SWAT tem se mostrado uma ferramenta poderosa e eficaz para diversos estudos (Blainski et al., 2017; Santos

et al., 2018; Martins et al., 2020; Andrade; Ribeiro, 2020; Lopes et al., 2021; Ferraz et al., 2021).

De tal modo, as curvas de permanência foram geradas a partir da série de dados utilizada nas etapas de calibração e validação, abrangendo o período de 1986 a 2020. A análise visual das curvas na Figura 7 confirma a boa correlação entre as vazões medidas e simuladas, evidenciando a tendência de superestimação exposta na análise de desempenho, especialmente nas sub-bacias 25 e 1. A vazão de permanência $< 20\%$ representa os picos de cheia e vazões máximas, sendo relevantes para estudos de enchentes, períodos de retorno e planejamento de infraestrutura hidráulica. Já as vazões associadas a altas permanências ($> 80\%$) indicam os fluxos de base, que correspondem ao escoamento mínimo sustentado por aquíferos e contribuições subterrâneas.

A partir das curvas de permanência é possível obter o valor da vazão de referência (Q95%), correspondente à vazão mínima para fins de gestão, a qual representa a oferta de água a ser considerada no Balanço Hídrico (ANA, 2024). Portanto, a análise das alterações no regime de vazões, seja através da modelagem hidrológica ou

das curvas de permanência derivadas da simulação, é essencial para compreender a variabilidade hidrológica, avaliar a disponibilidade hídrica, definir estratégias de regulação de reservatórios, planejar medidas de mitigação de inundações e secas e auxiliar a gestão dos recursos hídricos.

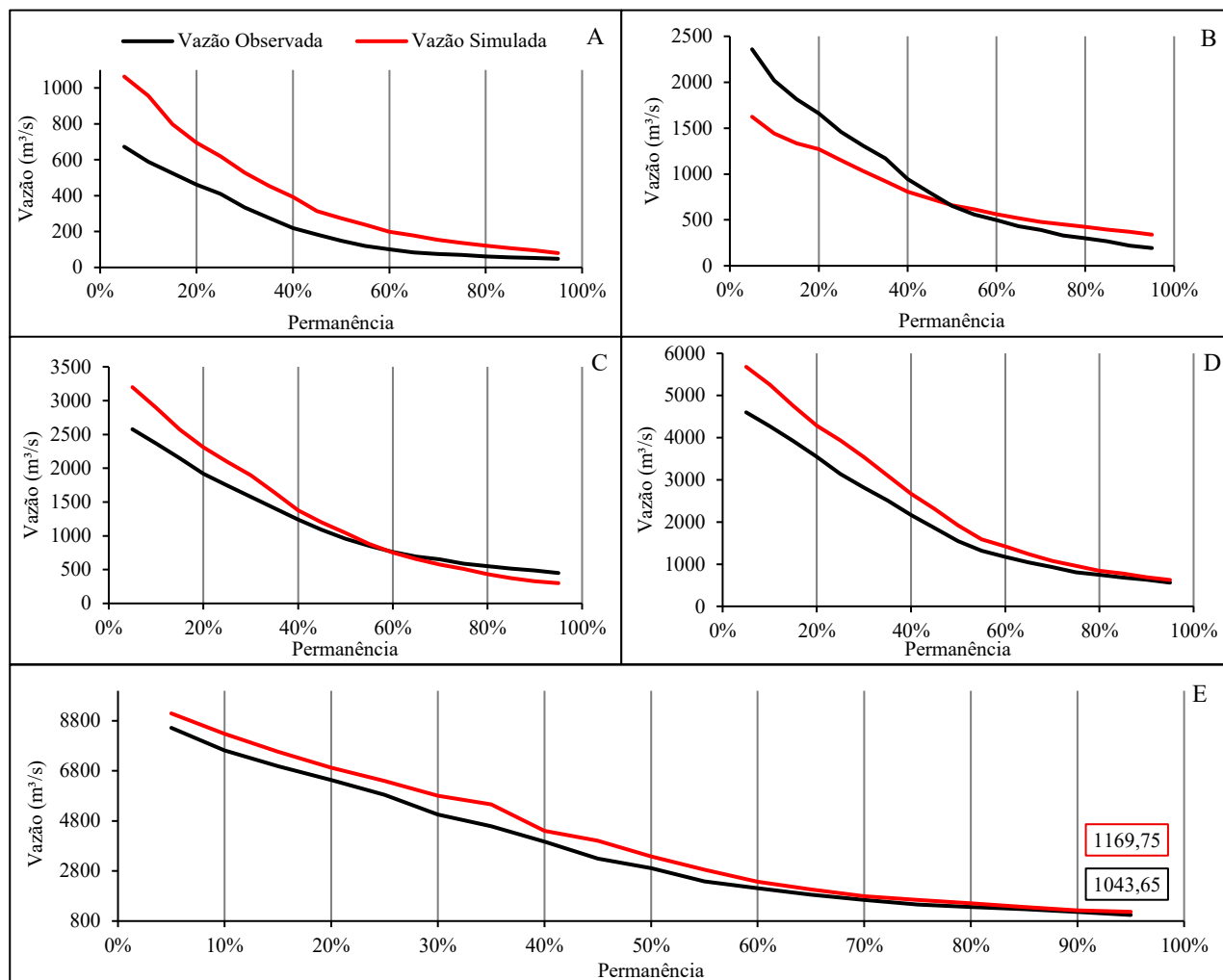


Figura 7. Curvas de Permanências das vazões mensais observadas e simuladas para: A) Sub-bacia 25; B) Sub-bacia 23; C) Sub-bacia 17; D) Sub-bacia 12; e E) Sub-bacia 1.

Conclusões

A calibração do modelo SWAT foi um processo essencial para garantir a precisão das simulações hidrológicas, permitindo uma melhor representação das condições reais da Bacia Hidrográfica do rio Teles Pires. O ajuste dos parâmetros realizado através da análise de sensibilidade melhorou a confiabilidade das previsões de vazão.

Mesmo com a limitação de dados observacionais, o SWAT apresentou excelente desempenho na maioria das sub-bacias, com altos valores de correlação e eficiência. A sub-bacia 25 apresentou os maiores desafios, enquanto a sub-bacia 1 foi a mais equilibrada em todas as métricas.

Ataide, L. C. P., Pessoa, F. C. L., Serrão, E. A. O.

Pequenas superestimativas foram observadas, mas sem comprometer a robustez do modelo, sugerindo que a precisão pode variar dependendo das características hidrológicas locais.

Os resultados gerais indicam que a calibração foi bem sucedida, garantindo que o modelo é capaz de representar de forma satisfatória a dinâmica hidrológica da região estudada. Dessa forma, a aplicação do SWAT demonstrou ser uma ferramenta eficaz para a simulação hidrológica, desde que os ajustes sejam realizados de forma criteriosa para minimizar incertezas e melhorar a representatividade dos processos físicos envolvidos.

Diante da escassez de estações fluviométricas na bacia do Teles Pires, a calibração do SWAT se torna ainda mais essencial para garantir simulações confiáveis, assumindo um papel crucial na gestão dos recursos hídricos da região. Com isso, os resultados obtidos não apenas permitem a compreensão do comportamento hidrológico da bacia, mas também auxiliam na avaliação de impactos ambientais, manejo de bacias hidrográficas, avaliação do balanço hídrico e estudos sobre mudanças climáticas.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisas (FAPESPA) e a Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação (PROPEP) da Universidade Federal do Pará pelo auxílio financeiro por meio do Edital 15/2021.

Referências

- Abbaspour, K.C., Rouholahnejad, E., Vaghefi, S., Srinivasan, R., Yang, H., Kløve, B., 2015. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology*, 524. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.027>.
- Abbaspour, K.C., Vaghefi, S.A., Srinivasan, R., 2018. A Guideline for Successful Calibration and Uncertainty Analysis for Soil and Water Assessment: A Review of Papers from the 2016 International SWAT Conference. *Water*, 10(1). Disponível: <https://doi.org/10.3390/w10010006>
- Almagro, A., Oliveira, P.T.S., Brocca, L., 2021. Assessment of bottom-up satellite rainfall products on estimating river discharge and hydrologic signatures in Brazilian catchments. *Journal of Hydrology*, 603 (Part A). Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126897>
- Almeida, C.T. de, Delgado, R.C., Oliveira Junior, J.F. de, Gois, G., Cavalcanti, A.S., 2015. Avaliação das estimativas de precipitação do produto 3B43-TRMM do estado do Amazonas. *Floresta e Ambiente*, 22. Disponível: <https://doi.org/10.1590/2179-8087.112114>
- 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). Disponível: <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v38n1p55-63/2018>
- ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2024. Resolução ANA nº 213, de 27 de setembro de 2024. Brasília.
- Andrade, C.W.L., Montenegro, S.M.G.L., Montenegro, A.A.A., Lima, J.R.S., Srinivasan, R., Jones, C.A., 2019. Soil moisture and discharge modeling in a representative watershed in northeastern Brazil using SWAT. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 19. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2018.09.002>
- Andrade, M.P. de., Ribeiro, C.B. de M., 2020. Impacts of land use and cover change on Paraíba do Sul watershed streamflow using the SWAT model. *RBRH*, 25. Disponível: <https://doi.org/10.1590/2318-0331.252020190034>
- Arnold, J.G., Moriasi, D.N., Gassman, P.W., Abbaspour, K.C., White, M.J., Srinivasan, R., Santhi, C., Harmel, R.D., van Griensven, A., Van Liew, M.W., Kannan, N., Jha, M.K., 2012. SWAT: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*, 55. Disponível: <https://doi.org/10.13031/2013.42256>
- Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S., Williams, J.R., 1998. Large area hydrologic modeling and assessment Part I: Model development. *Journal of the American Water Resources Association*, 34(1). Disponível: <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>
- Ávila, L., Silveira, R., Campos, A., Rogiski, N., Gonçalves, J., Scortegagna, A., Freitas, C., et al., 2022. Comparative evaluation of five hydrological models in a large-scale and tropical river basin. *Water*, 14(19). Disponível: <https://doi.org/10.3390/w14193013>
- Bennour, A., Jia, L., Menenti, M., Zheng, C., Zeng, Y., Asenso Barnieh, B., Jiang, M., 2022. Calibration and Validation of SWAT Model by Using Hydrological Remote Sensing Observables in the Lake Chad Basin. *Remote Sensing*, 14(6). Disponível: <https://doi.org/10.3390/rs14061511>
- Blanco, C.J.C., Santos, S.S.M., Quintas, M.C., Vinagre, M.V.A., Mesquita, A.L.A., 2013. Contribution to hydrological modelling of small Amazonian catchments: application of rainfall-runoff models to simulate flow duration curves. *Hydrological Sciences Journal*, 58(7). Disponível: <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.830727>
- Blainski, É., Acosta, E., Nogueira, P.C. do P., 2017. Calibração e validação do modelo SWAT para simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica do litoral norte catarinense. *Revista Ambiente & Água*, 12(2). Disponível: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1951>
- Borella, D.R., de Souza, A.P., de Almeida, F.T., de Abreu, D.C., Hoshide, A.K., Carvalho, G.A.,

- Pereira, R.R., da Silva, A.F., 2022. Dynamics of Sediment Transport in the Teles Pires River Basin in the Cerrado-Amazon, Brazil. *Sustainability*, 14(23). Disponível: <https://doi.org/10.3390/su142316050>
- Bressiani, D.A., Gassman, P.W., Fernandes, J.G., Garbossa, L.H.P., Srinivasan, R., Bonumá, N. B., et al., 2015. Review of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) applications in Brazil: Challenges and prospects. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 8(3), 9–35.
- Brighenti, T.M., Bonumá, N.B., Srinivasan, R., Chaffe, P.L.B., 2019. Simulating sub-daily hydrological processes with SWAT: A review. *Hydrological Sciences Journal* 64(12). Disponível: <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1642477>
- Cavalcante, R.B.L., Ferreira, D.B.S., Pontes, P.R.M., Tedeschi, R.G., da Costa, C.P.W., de Souza, E.B., 2020. Evaluation of extreme rainfall indices from CHIRPS precipitation estimates over the Brazilian Amazonia. *Atmospheric Research* 238, Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.104879>
- Collischonn, B., Collischonn, W., Tucci, C.E.M., 2008. Daily hydrological modeling in the Amazon Basin using TRMM rainfall estimates. *Journal of Hydrology* 360. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.07.032>
- Costa, J., Pereira, G., Siqueira, M.E., Cardozo, F., da Silva, V. V., 2019. Validação dos dados de precipitação estimados pelo CHIRPS para o Brasil. *Revista Brasileira de Climatologia*, 15. Disponível: <https://doi.org/10.5380/abclima.v24i0.60237>
- Cunge, J.A., 1969. On the subject of a flood propagation computation method (Muskingum method). *Journal of Hydraulic Research* 7(2). Disponível: <https://doi.org/10.1080/00221686909500264>
- de Oliveira-Júnior, J.F., da Silva Junior, C.A., Teodoro, P.E., et al., 2021. Confronting CHIRPS dataset and in situ stations in the detection of wet and drought conditions in the Brazilian Midwest. *International Journal of Climatology*, 41. Disponível: <https://doi.org/10.1002/joc.7080>
- 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. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.08.004>
- 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. Disponível: <https://doi.org/10.3390/w10040429>
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2018. Sistema brasileiro de classificação dos solos (5. ed.). Brasília.
- EPE. Empresa de Pesquisa Energética, 2009. AAI Teles Pires: Relatório Final - Sumário Executivo. Rio de Janeiro.
- FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2016. Land Cover Classification System: Classification concepts, Software version 3. Disponível: <https://openknowledge.fao.org/items/a1c47421-3330-42a8-986f-461b05af6260>
- FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2025. Soil and Water Assessment Tool (SWAT).
- Farias, C.W.L. de A., Viana, J.F. de S., Miranda, R. de Q., Silva, S.F. da, 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). Disponível: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v16.3.p1621-1628>
- Fassoni-Andrade, A., Fleischmann, A., Papa, F., Paiva, R., Wongchuig, S., Melack, J., 2023. Hidrologia da Amazônia vista do espaço: avanços científicos e desafios futuros. ABRHidro. São Paulo.
- Fearnside, P.M., 2019. Impactos das hidrelétricas na Amazônia e a tomada de decisão. *Novos Cadernos NAEA*, 22(3). Disponível: <https://doi.org/10.18542/ncn.v22i3.8985>
- Ferraz, L.L., Sousa, L.F., Silva, L.S., Silva, J.O., Tagliaferre, C., Santos, C.A.S., Rocha, F.A. 2021. Calibration and validation of the SWAT model for hydrological simulation in a basin in Western Bahia. *Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais*, 12(1). Disponível: <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.001.0023>
- Ferreira, A.D.N., de Almeida, A., Koide, S., Minoti, R.T., Siqueira, M.B.B.D, 2021. Evaluation of Evapotranspiration in Brazilian Cerrado Biome Simulated with the SWAT Model. *Water*, 13(15). Disponível: <https://doi.org/10.3390/w13152037>
- Finger, D., Vis, M., Huss, M., Seibert, J., 2015. The value of multiple data set calibration versus model complexity for improving the performance of hydrological models in

- mountain catchments. *Water Resources Research*, 51. Disponível: <https://doi.org/10.1002/2014WR015712>
- Gassman, P.W., Sadeghi, A.M., Srinivasan, R., 2014. Special section on SWAT applications: Overview and insights. *Journal of Environmental Quality*, 43(1). Disponível: <https://doi.org/10.2134/jeq2013.11.0466>
- Guilhen, J., Parrens, M., Sauvage, S., Santini, W., Mercier, F., Al Bitar, A., Fabre, C., Martinez, J.-M., Sánchez-Pérez, J.-M., 2022. Estimation of the Madeira floodplain dynamics from 2008 to 2018. *Frontiers in Water*, 4. Disponível: <https://doi.org/10.3389/frwa.2022.952810>
- Gupta, H.V., Sorooshian, S., Yapo, P.O., 1999. Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. *Journal of Hydrologic Engineering*, 4(2). Disponível: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(1999\)4:2\(135\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(1999)4:2(135))
- Hurtado, T.C.C., Leite, G.M., Carvalho, D. de A., Silva, S.A.A. da., 2024. Outorga como instrumento de gestão de uso dos recursos hídricos na bacia hidrográfica do Baixo Teles Pires. *Research, Society and Development*, 13(3). Disponível: <https://doi.org/10.33448/rsd-v13i3.45318>
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2013. Manual técnico de uso da terra. Rio de Janeiro.
- IMAZON. Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia, 2022. Desmatamento na Amazônia cresce 29% em 2021 e é o maior dos últimos 10 anos. Disponível: <https://imazon.org.br/imprensa/desmatamento-na-amazonia-cresce-29-em-2021-e-e-o-maior-dos-ultimos-10-anos/> Acesso: 26 de fevereiro de 2025
- INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2020. Estimativa de desmatamento por corte raso na Amazônia Legal para 2020 é de 11.088 km² (Nota Técnica). São José dos Campos.
- Kraeski, A., de Almeida, F.T., de Souza, A.P., de Carvalho, T.M., de Abreu, D.C., Hoshide, A.K., Zolin, C.A., 2023. Land Use Changes in the Teles Pires River Basin's Amazon and Cerrado Biomes, Brazil. *Sustainability*, 15, Disponível: <https://doi.org/10.3390/su15054611>
- Lopes, T.R., Zolin, C.A., Mingoti, R., Vendrusculo, L.G., Almeida, F.T., Souza, A.P., Oliveira, R.F., Paulino, J., Uliana, E.M., 2021. Hydrological regime, water availability and land use/land cover change impact on the water balance in a large agriculture basin in the Southern Brazilian Amazon. *Journal of South American Earth Sciences*, 108. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103224>
- Louzada, V.M., Ribeiro, C.B. de M., 2019. Impacts of land-use change on southeast Amazonia basin streamflow. *Revista Ambiente & Água*, 14(2). Disponível: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2303>
- MapBiomas, 2024. Relatório Anual de Desmatamento no Brasil – RAD 2023. Disponível: https://alerta.mapbiomas.org/wp-content/uploads/sites/17/2024/10/RAD2023_COMPLETO_15-10-24_PORTUGUES.pdf Acesso: 26 de fevereiro de 2025
- Martínez, S., Mollicone, D., 2012. From land cover to land use: A methodology to assess land use from remote sensing data. *Remote Sensing*, 4. Disponível: <https://doi.org/10.3390/rs4041024>
- 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.
- Mendes, F.D. de S., 2021. Avaliação da aplicação do modelo SWAT para simulações hidrológicas na bacia hidrográfica do rio Bicudo, em Minas Gerais (Dissertação de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – PROFÁGUA). Instituto de Ciências Puras e Aplicadas, Universidade Federal de Itajubá, Campus de Itabira, Minas Gerais.
- Mendonça, L.M. de, Blanco, C.J.C., de Oliveira Carvalho, F., 2023. Recurrent neural networks for rainfall-runoff modeling of small Amazon catchments. *Modeling Earth Systems and Environment*, 9. Disponível: <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01626-w>
- Mingoti, R., Spadotto, C.A., Moraes, D.A. de C., 2016. Suscetibilidade à contaminação da água subterrânea em função de propriedades dos solos no Cerrado brasileiro. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 51(9). Disponível: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900025>
- Molina-Navarro, E., Bailey, R.T., Andersen, H.E., Thodsen, H., Nielsen, A., Park, S., Trolle, D., 2019. Comparison of abstraction scenarios simulated by SWAT and SWAT-MODFLOW. *Hydrological Sciences Journal*, 64(4). Disponível: <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1590583>
- Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Liew, M.W.V., Bingner, R.L., Harmel, R.D., Veith, T.L., 2007. Model evaluation guidelines for systematic

- quantification of accuracy in watershed simulations. *Watershed Simulations*, 50(3), 885–900.
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models Part I— A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10. Disponível: [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R., 2011. Soil and water assessment tool: Theoretical documentation: Version 2009. Blackland Research Center. Disponível: <https://swat.tamu.edu/media/99192/swat2009-theory.pdf>
- Nobre, C.A., Obregón, G.O., Marengo, J.A., Fu, R., Poueda, G., 2009. Características do clima amazônico: Aspectos principais. In *Amazonia and Global Change, Geophysical Monograph Series*, 49–162. American Geophysical Union.
- Nunes, G., Minoti, R.T., Koide, S., 2020. Mathematical Modeling of Watersheds as a Subsidy for Reservoir Water Balance Determination: The Case of Paranoá Lake, Federal District, Brazil. *Hydrology*, 7(4). Disponível: <https://doi.org/10.3390/hydrology7040085>
- Ougahi, J.H., Karim, S., Mahmood, S. A., 2022. Application of the SWAT model to assess climate and land use/cover change impacts on water balance components of the Kabul River Basin, Afghanistan. *Journal of Water and Climate Change*, 13(11). Disponível: <https://doi.org/10.2166/wcc.2022.261>
- Paul, M., Dangol, S., Kholodovsky, V., Sapkota, A. R., Negahban-Azar, M., Lansing, S., 2020. Modeling the Impacts of Climate Change on Crop Yield and Irrigation in the Monocacy River Watershed, USA. *Climate*, 8(12). Disponível: <https://doi.org/10.3390/cli8120139>
- Pereira, D.R., Martinez, M.A., Pruski, F.F., 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. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2016.05.002>
- Pessoa, F.C.L., Blanco, C.J.C., Gomes, E.P., 2021. Regionalization of flow duration curves in the Amazon with the definition of homogeneous regions via fuzzy C-means. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 93(1). Disponível: <https://doi.org/10.1590/0001-3765202120190747>
- Priya, R.Y., Manjula, R., 2021. A review for comparing SWAT and SWAT coupled models and its applications. *Materials Today: Proceedings*, 45(7). Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.414>
- Rasheed, N.J., Al-Khafaji, M.S., Alwan, I.A., Al-Suwaiyan, M.S., Doost, Z.H., Yaseen, Z.M., 2024. Survey on the resolution and accuracy of input data validity for SWAT-based hydrological models. *Heliyon*, 10(19). Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e38348>
- Rufino, P.R., Gücker, B., Faramarzi, M., Boëchat, I.G., Cardozo, F.D S., Santos, P.R., Zanin, G.D., Mataveli, G., Pereira, G., 2023. Evaluation of the SWAT Model for the Simulation of Flow and Water Balance Based on Orbital Data in a Poorly Monitored Basin in the Brazilian Amazon. *Geographies*, 3(1). Disponível: <https://doi.org/10.3390/geographies3010001>
- Santos, C.A.S., Almeida, C., Ramos, T.B., Rocha, F.A., Oliveira, R., Neves, R. 2018. Using a Hierarchical Approach to Calibrate SWAT and Predict the Semi-Arid Hydrologic Regime of Northeastern Brazil. *Water*, 10(9). Disponível: <https://doi.org/10.3390/w10091137>
- Sena, C.C.R., Silva, G.C., Evangelista, Z.R., Nunes, M.E., Pego, A.W.E., 2021. Atributos físico-hídricos de solos do Cerrado. *Revista Agrotecnologia*, 12(1), 80–91.
- Serrão, E.A. de O., Silva, M.T., Ferreira, T.R., Ataíde, L.C.P. de., Wanzeler, R. T. S., Silva, V.P.R. da, Lima, A.M.M. de, Sousa, F.de A.S., 2021. Large-scale hydrological modelling of flow and hydropower production in a Brazilian watershed. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 21(1). Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2020.09.002>
- Serrão, E.A. de O., Silva, M.T.; Ferreira, T.R., Xavier, A.C.F.; Santos, C.A. dos; Ataíde, L.C.P. de, Pontes, P.R.M., da Silva, V.de P.R., 2023. Climate and land use change: future impacts on hydropower and revenue for the amazon. *Journal of Cleaner Production*, 385. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135700>
- Serrão, E.A.O., Cavalcante, R.B.L., Zanin, P.R., et al., 2025. The effects of teleconnections on water and carbon fluxes in the two South America's largest biomes. *Scientific Reports*, 15. Disponível: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-85272-z>
- Sharpley, A.N., Williams, J. R. (Eds.), 1990. EPIC—Erosion Productivity Impact Calculator: Model documentation (Vol. 1). U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Technical Bulletin 1768.
- Silva Junior, C.H.L., Pessôa, A.C.M., Carvalho, N.S., et al., 2021. The Brazilian Amazon deforestation rate in 2020 is the greatest of the

- decade. *Nature Ecology & Evolution*, 5. Disponível: <https://doi.org/10.1038/s41559-020-01368-x>
- Silva, A.K.L., 2016. Impacto da expansão da palma de óleo sobre o escoamento superficial e produção de sedimentos nas sub-bacias hidrográficas não monitoradas dos rios Bujaru e Mariquita no Nordeste do Estado do Pará, Amazônia Oriental (Tese de doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Disponível: <https://repositorio.ufra.edu.br/jspui/handle/123456789/1198>
- Silva, M., Azevedo, P.V. de, Silva, V.R. da, Silva, B.K. da N., Mariano, E.B., Amorim, M.R.B., 2017. Estimativa da produção de sedimentos na bacia hidrográfica do submédio rio São Francisco. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, 2(3). Disponível: <https://doi.org/10.24221/jeap.2.3.2017.1430.203-211>
- Silva, R.M., Dantas, J.C., Beltrão, J.de A., Santos, C.A.G., 2018. Hydrological simulation in a tropical humid basin in the Cerrado biome using the SWAT model. *Hydrology Research*, 49(3). Disponível: <https://doi.org/10.2166/nh.2018.222>
- Song, X., Zhang, J., Zhan, C., Xuan, Y., Ye, M., Xu, C., 2015. Global sensitivity analysis in hydrological modeling: Review of concepts, methods, theoretical framework, and applications. *Journal of Hydrology*, 523. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.02.013>
- Suryavanshi, S., Pandey, A., Chaube, U. C., 2017. Hydrological simulation of the Betwa River basin (India) using the SWAT model. *Hydrological Sciences Journal*, 62(6). Disponível: <https://doi.org/10.1080/02626667.2016.1271420>
- Suwannachai, L., Sriworamas, K., Sivanpheng, O., Kangrang, A., 2024. Application of SWAT Model for Assessment of Surface Runoff in Flash Flood Areas. *Water*, 16(3). Disponível: <https://doi.org/10.3390/w16030495>
- Tamm, O., Maasikamäe, S., Padari, A., Tamm, T., 2018. Modelling the effects of land use and climate change on the water resources in the eastern Baltic Sea region using the SWAT model. *Catena*, 167. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.04.029>
- Tarekegn, N., Abate, B., Muluneh, A., et al., 2022. Modeling the impact of climate change on the hydrology of Andasa watershed. *Model. Earth Syst. Environ.*, 8. Disponível: <https://doi.org/10.1007/s40808-020-01063-7>
- Tucci, C.E.M., 1993. *Hidrologia: Ciência e aplicação*. Editora UFRGS.
- Tucci, C.E.M., 2005. *Modelos hidrológicos* (2ª ed.). Editora UFRGS.
- Tudose, N.C., Marin, M., Cheval, S., Ungurean, C., Davidescu, S.O., Tudose, O.N., Mihalache, A. L., Davidescu, A.A., 2021. SWAT model adaptability to a small mountainous forested watershed in central Romania. *Forests*, 12(7). Disponível: <https://doi.org/10.3390/f12070860>
- Williams, J.R., 1969. Flood routing with variable travel time or variable storage coefficients. *Transactions of the ASAE*, 12(1), 100–103.
- Wongchuig, S.C., de Paiva, R.C.D., Siqueira, V., Collischonn, W., 2019. Hydrological reanalysis across the 20th century: A case study of the Amazon Basin. *Journal of Hydrology*, 570. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.01.025>
- Zaiatz, A.P.S.R., Zolin, C.A., Vendrusculo, L.G., Lopes, T.R., Paulino, J., 2018. Agricultural land use and cover change in the Cerrado/Amazon ecotone: A case study of the upper Teles Pires River basin. *Acta Amazonica*, 48(2). Disponível: <https://doi.org/10.1590/1809-4392201701930>
- Zeilhofer, P., Hallak Alcantara, L., Fantin-Cruz, I., 2018. Effects of deforestation on spatio-temporal runoff patterns in the upper Teles Pires watershed, Mato Grosso, Brazil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 11, 1889-1901.