

Calibração e validação do modelo hidrológico SWAT para a simulação da vazão de uma bacia amazônica altamente preservada

Calibration and validation of the SWAT hydrologic model for the simulation of flow in a highly Preserved amazon basin

Calibración y validación del modelo hidrológico SWAT para la simulación del caudal de una cuenca amazónica altamente preservada



Paulo Ricardo Rufino

Universidade de São Paulo, USP, São Paulo, Brasil

paulorufino@usp.br



Francielle da Silva Cardozo

Universidade Federal de São João del Rei – Minas Gerais - Brasil

franciellecardozo@ufsj.edu.br



Gabriel Pereira

Universidade Federal de São João del Rei – Minas Gerais - Brasil

Universidade de São Paulo - São Paulo - Brasil

pereira@ufsj.edu.br

Resumo Atualmente, verifica-se um aumento na escassez de água em todo o mundo, o que impacta diretamente na demanda por esse recurso. Nesse contexto, a modelagem hidrológica torna-se uma ferramenta indispensável na avaliação e gestão desse recurso natural. O objetivo deste estudo consistiu em analisar o desempenho do modelo SWAT na geração da vazão da bacia hidrográfica do Rio Jari, localizado no bioma Amazônia. Foram realizadas as etapas de calibração, validação e análise de incertezas relacionadas à modelagem, utilizando o algoritmo SUFI-2. Os resultados obtidos demonstram um bom desempenho do modelo, verificado por meio de métricas estatísticas aplicadas nas etapas de calibração e validação, respectivamente. Esses resultados

permitem concluir que, após a calibração, o modelo foi capaz de gestão da bacia do Rio Jari.

Palavras-Chave: Modelagem Hidrológica; Amazônia; Rio Jari; SUFI-2.

Abstract Currently, there has been an increase in water scarcity worldwide, and the demand for this resource is expected to rise in the coming decades. Therefore, hydrological modeling has become an essential tool for assessing and managing this natural resource. The objective of this study was to analyze the performance of the SWAT model in generating the flow rate of the Jari River watershed in the Amazon biome. Calibration, validation, and analysis of modeling uncertainties were conducted using the SUFI-2 algorithm. The results obtained demonstrate good model performance, as verified by statistical metrics in both the calibration and validation stages. These results allow us to conclude that, following calibration, the model was capable of accurately reproducing the flow, making it a valuable management tool for the Jari River basin

Keywords: Hydrological Modeling; Amazon; Jari River; SUFI-2.

Resumen Actualmente, se ha producido un aumento en la escasez de agua en el mundo, y la demanda de este recurso tiende a aumentar en las próximas décadas. Por lo tanto, la modelización hidrológica se convierte en una herramienta indispensable en la evaluación y gestión de este recurso natural. El objetivo de este estudio fue analizar el rendimiento del modelo SWAT para la generación del caudal de la cuenca del río Jari, en el bioma Amazónico. Se llevaron a cabo la calibración, validación y análisis de la incertidumbre relacionados con la modelización mediante el algoritmo SUFI-2. Los resultados obtenidos demuestran un buen rendimiento del modelo, verificado mediante métricas estadísticas para las etapas de calibración y validación, respectivamente. Los resultados permiten concluir que, tras la calibración, el modelo fue capaz de reproducir adecuadamente el caudal, lo que permite su uso como herramienta de gestión para la cuenca del río Jari.

Palabras Claves: Modelización hidrológica; Amazonas; Rio Jari; SUFI-2.

Introdução

Nas últimas décadas tem se verificado uma crescente preocupação em relação à disponibilidade de água no mundo (Kummu *et al.*, 2016), agravada pelo aumento na demanda por esse recurso natural em razão do crescimento econômico e populacional (Nechifor; Winning, 2018). A bacia Amazônica, maior bacia hidrográfica do mundo, ocupa uma área com mais de 7 milhões de km², e possui a maior descarga de água doce sobre os oceanos (Junk; Soares; Bayley, 2007). Além de ser considerada como uma importante fonte de biodiversidade (Fearnside, 2021), possui grande importância global para os ciclos hidrológicos, devido às suas altas taxas de evapotranspiração (Lathuillière; Coe; Johnson, 2016).

Portanto, a bacia amazônica pode ser identificada como uma região chave do ponto de vista regional e global, e torna-se cada vez mais necessário uma melhor compreensão sobre seu comportamento hidrológico. Sendo assim, o uso de modelos hidrológicos torna-se uma ferramenta fundamental no planejamento e gestão desse recurso natural (Abdulkareem *et al.*, 2018). Segundo Soltani; Ataie-Ashtiani; Simmons (2021) a modelagem hidrológica pode ser considerada como uma técnica eficaz e indispensável no monitoramento e na avaliação de alterações sobre o ciclo hidrológico e recursos hídricos.

Atualmente, existe uma gama de modelos hidrológicos que fornecem diferentes interpretações e entendimentos sobre os sistemas ambientais (Devak; Dhanya, 2017). Modelos hidrológicos distribuídos podem representar processos específicos de água através do espaço, como por exemplo, o fluxo superficial, a evapotranspiração, acumulação e derretimento de neve, infiltração, fluxo de água subterrânea, armazenamento de umidade no solo, entre outros. A diferença está na abordagem utilizada por cada modelo na representação desses processos hidrológicos (Kampf; Burges, 2007).

Dentre os modelos mais empregados na atualidade, está o *Soil and Water Assessment Tool* - SWAT (Arnold *et al.*, 1998), modelo este desenvolvido pelo *Agricultural Research Service, United States Department of Agriculture* (ARS-USDA) e pela *Texas A&M University*. O SWAT é um modelo de tempo contínuo e de base física, desenvolvido para o estudo e gestão de bacias hidrográficas, avaliação de impactos de gerenciamento, sedimentos, entre outros (Arnold *et al.*, 1998; Gassman *et al.*, 2007), e possui grande aceitação internacional como uma ferramenta de modelagem interdisciplinar de bacias hidrográficas (Gassman *et al.*, 2007).

O uso deste modelo no Brasil tem-se ampliado nos últimos anos, entretanto a região amazônica possui menos aplicações deste modelo em relação as demais regiões (Bressiani *et al.*, 2015). Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi de avaliar a aplicabilidade e desempenho do modelo SWAT na reprodução da vazão da Bacia Hidrográfica do Rio Jari (BHRJ), situada na Amazônia oriental.

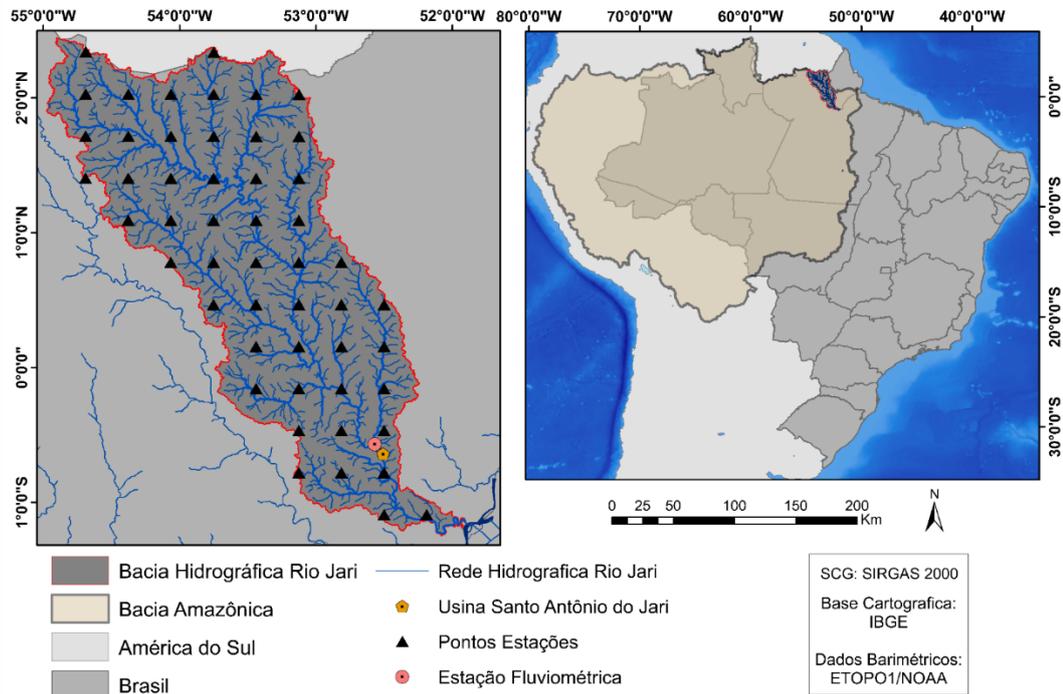
Materiais e Métodos

Localização e caracterização da área de estudo

A bacia hidrográfica do Rio Jari – BHRJ (Figura 1) se localiza entre os Estados do Pará e Amapá, desaguando na margem esquerda do Rio Amazonas. Sua nascente se encontra na Serra do Tumucumaque, bem próximo à fronteira brasileira com o Suriname. O Rio Jari possui uma área de aproximadamente 57 mil km², coberto pela floresta ombrófila densa, sendo cortada apenas por florestas aluviais (Epe, 2011).

As atividades econômicas sobre a bacia são pequenas, tendo destaque para os empreendimentos no sul da bacia como a Jari Celulose e a Usina de Santo Antônio do Jari. Na região central, a ocupação é mínima e verifica-se a presença de Unidades de Conservação de Proteção Integral e de Uso Sustentável, enquanto na região norte verifica-se a presença de terras indígenas (Epe, 2011).

Figura 1: Localização da bacia hidrográfica do Rio Jari



Fonte: Autoria própria.

Dados de Entrada

Para a delimitação da bacia hidrográfica e de sua rede de drenagem foi utilizado o modelo digital de elevação (MDE) (Figura 2A), proveniente do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), com resolução de 30 metros, obtido junto ao *United States Geological Survey* (USGS) (Farr *et al.*, 2007). Na geração das *Hidrologic response units* (HRUs) fez-se necessárias informações em relação ao uso e cobertura da terra (Figura 2B), a qual foi obtida a partir da coleção 4.0 referente ao ano de 2018 do Projeto MapBiomas, com uma resolução espacial de 30 metros (MAPBIOMAS, 2020). Foi realizada uma reclassificação com base nas classes existentes no banco de dados do SWAT e os usos encontrados (Tabela 1), foram: Floresta Nativa (98,91%), Pastagem (0.60%), Eucalyptus (0.25%), Corpos Hídricos (0.20%) e Zonas Húmidas/Herbáceas (0.04%), demais usos não apresentaram porcentagens significativas.

Tabela 1: Correspondências entre classes MapBiomas e SWAT

MapBiomas	SWAT	% Área
Floresta Natural	Floresta Tropical	98,91
Pastagem	Pastagem	0,60
Floresta Plantada	Eucalyptus	0,25
Rio, Lago e Oceano	Água	0,20
Área Úmida Natural não Florestal	Áreas úmidas não florestadas	0,04

Fonte: Autoria própria.

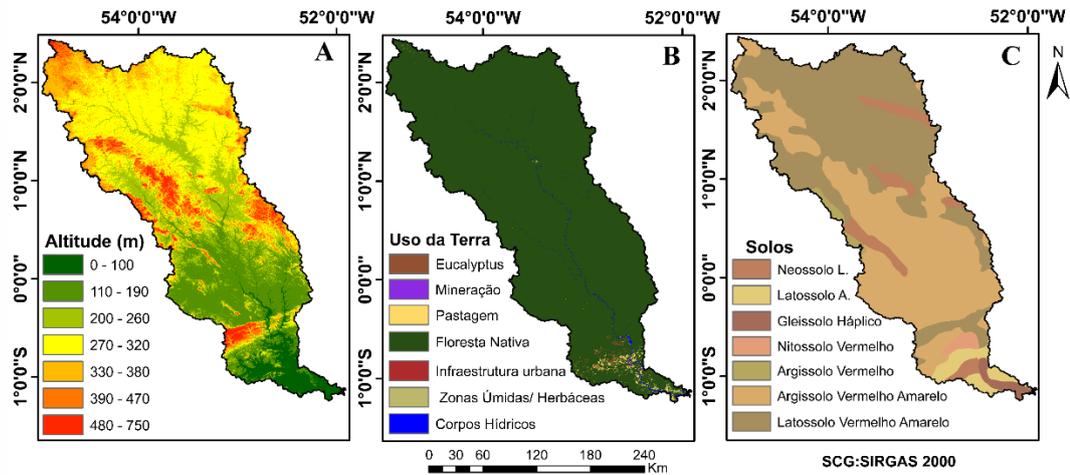
Os dados referentes à distribuição espacial dos solos (Figura 2C) foram obtidos da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) referente a classificação de 2011, e possui uma escala de 1:5.000.000 (SANTOS *et al.*, 2018a). As classes de solos presentes na bacia (Tabela 2), sendo elas: Latossolo Vermelho Amarelo (45,99%), Argissolo Vermelho Amarelo (41,82%), Neossolo Litólico (5,52%), Latossolo Amarelo (3,34%), Gleissolo Háplico (1,28%), Argissolo Vermelho (1,06%) e Nitossolo Vermelho (0,99%). Adicionalmente ao mapa de solos foi elaborado um banco de dados com as características de cada tipo de solo presente na bacia e obtidos na literatura (BALDISSERA, 2005; DIAS, 2017; ROSA, 2016b). A distribuição espacial da altimetria, uso e cobertura da terra e os solos podem ser visualizados na Figura 2.

Tabela 2: Correspondências entre solos EMPRAPA e o código adotado no SWAT.

Solos Embrapa	SWAT CODE	% Área
Latossolo vermelho amarelo	LVAM	45,99
Argissolo Vermelho Amarelo	PVAM	41,82
Neossolo Litólico	RLIT	5,52
Latossolo amarelo	LAMA	3,34
Gleissolo Háplico	GXHA	1,28
Argissolo Vermelho	PVER	1,06
Nitossolo Vermelho	NEVR	0,99

Fonte: Autoria própria.

Figura 2: Distribuição espacial dos dados de entrada utilizados na modelagem. Modelo Digital de Elevação (A), Uso e cobertura da Terra (B) e Solos (C).



Em relação aos dados climáticos definiu-se 50 pontos (Figura 1) garantindo a representatividade climática da bacia. Utilizou-se dados de temperaturas máximas e mínimas do ar ($^{\circ}\text{C}$), umidade relativa (%), velocidade do vento (m/s) e radiação solar (MJ/m^2), obtidos da base de dados climáticos globais denominado *Global Weather Data for SWAT* (GWDS), e que utiliza a base do *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP), denominados de *Climate Forecast System Reanalysis v3* (CFSR.v3) e abrange o período de 1979 à 2014 (NCAR, 2021). Outro dado climático utilizado na simulação foi o de precipitação (mm), proveniente do *Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Stations* (CHIRPS), a partir de um conjunto de dados de precipitação diário (de 1981 até quase o presente), de alta resolução temporal e baseado em várias fontes de dados, as quais incluem estações meteorológicas (Funk *et al.*, 2015). Como as séries climáticas estavam sem falhas, estas foram inseridas no módulo climático do SWAT.

Para a calibração e validação do modelo empregou-se dados de vazão mensal provenientes da Agência Nacional de Águas (ANA). As séries históricas das vazões da BHRJ correspondem ao período de 1984 a 2013 da Estação São Francisco (19150000) (ANA, 2020). É importante ressaltar que os dados apresentavam uma boa qualidade das informações, o que possibilitou

a realização da calibração precisa do modelo. Apesar da limitação de ter apenas uma estação de medição de vazão na bacia, as medições foram consistentes e confiáveis, permitindo uma análise robusta do comportamento hidrológico do sistema. Não foi necessário realizar nenhum procedimento adicional de correção dos dados, devido à sua confiabilidade.

Configuração do Modelo

O modelo foi configurado utilizando-se a interface SWAT 2012 incorporado ao sistema de informações geográficas Arcgis (Versão 10.5). Inicialmente essa configuração ocorreu a partir do MDE, onde SWAT delimitou e criou 126 sub-bacias. Posteriormente ocorreu a geração das HRUs a partir da combinação dos mapas de uso e cobertura da terra, tipos de solo e declividade (gerada a partir do MDE e baseado nas classes da EMBRAPA) (Santos *et al.*, 2018a). Como método de geração das HRUs, utilizou-se o método HRUs Múltiplas, sendo aplicado um fator de redução de 5%, originando 845 HRUs.

Posteriormente ocorreu a inserção dos dados climáticos no modelo, que correspondem ao período de 1981 à 2013, série temporal escolhida em razão dos dados GWDS se estenderem até meados de 2014. Sendo assim, considerando que os dados climáticos possuem uma amplitude de 33 anos (1981 - 2013), definiu-se o período de "Warm-up" de 3 anos (1981 - 1984) e 30 anos para a realização das simulações (1984 - 2013). A definição do *Warm-up* é realizada para dar equilíbrio as simulações e para que o ciclo hidrológico seja gerado adequadamente (ARNOLD *et al.*, 2012), e para o cálculo da Evapotranspiração Potencial utilizou-se o método Priestley-Taylor.

Configurações Adicionais

Além dos requisitos mínimos para a configuração do modelo SWAT, realizou-se modificações adicionais com o objetivo de aproximar a simulação da realidade da bacia, conforme realizado por Arroio Junior (2016). Foram

modificados parâmetros relacionados ao crescimento de plantas (tabela 3), como OV_N (Valor "n" de Manning para fluxo terrestre), BLAI (Índice máximo de área foliar), CHTMX(m) (Altura máxima do dossel), RDMX (m) (Profundidade máxima da raiz), FRGRW1 e FRGRW2 (Fração do índice de área foliar máximo para o primeiro e segundo ponto de desenvolvimento de área foliar) e LAIMX1 e LAIMX2 (Fração do índice de área foliar máximo para o primeiro e segundo ponto de desenvolvimento de área foliar), parâmetros estes relacionados ao crescimento vegetal.

Tabela 3: Parâmetros selecionados de crescimento vegetal.

Parâmetros	Uso da Terra			Fonte
	Past	Flor. N.	Eucalyp.	
OV_N	0.13	0.4	--	(MCCUEN, 1998)
BLAI	2.4	6	--	(ALMEIDA; SOARES, 2003; ROBERTS <i>et al.</i> , 1996; SAMANTA <i>et al.</i> , 2012)
CHTMX(m)	0.5	20	--	(COSTA <i>et al.</i> , 2004; DIAS-FILHO, 2012; ROSA, 2016a)
RDMX (m)	1	--	--	(MULLER <i>et al.</i> , 2001; SANTOS <i>et al.</i> , 2007)
FRGRW1	--	--	0.16	(ARROIO JUNIOR, 2016)
LAIMX1	--	--	0.2	(ARROIO JUNIOR, 2016)
FRGRW2	--	--	0.6	(ARROIO JUNIOR, 2016)
LAIMX2	--	--	0.61	(ARROIO JUNIOR, 2016)

Fonte: Autoria própria.

Sensibilidade, Calibração e Validação

Finalizada a configuração do Modelo Inicial foi iniciada a Análise de Sensibilidade, Calibração e Validação da vazão do modelo, conforme proposto por Abbaspour *et al.*, (2015). Todos esses procedimentos metodológicos foram realizados no software *Calibration and Uncertainty Procedures - SWAT CUP* versão 5.2.1.1, que é um programa autônomo, cuja finalidade é realizar a calibração, validação e análise de incertezas relacionadas ao modelo SWAT. Dentre as técnicas disponíveis neste

software, utilizou-se o *Sequential Uncertainty Fitting version 2* (SUFI-2) (ABBASPOUR *et al.*, 2015).

No SUFI-2 as incertezas nos parâmetros de entrada são representados por distribuições uniformes, enquanto as incertezas de saídas do modelo são representadas pelas incertezas de previsão de 95% ou 95PPU, obtidas através de hipercubo latino e avaliadas pelas métricas estatísticas *p-factor*, que indica a parcela de dados medidos mais seu erro, agrupados pelo 95PPU, e *r-factor*, que indica a razão da banda da largura de 95PPU e o desvio padrão da variável medida, onde essas métricas avaliam a força da calibração e ambas são intimamente ligadas (Abbaspour *et al.*, 2007, 2015). Como função objetivo adotou-se bR^2 (Krause; Boyle; Bäse, 2005).

Em seguida, realizou-se a análise de sensibilidade, a partir do método de análise denominado *Global Sensitivity Analysis*, o qual define o nível de sensibilidade através de regressão múltipla e verificada pelos dos índices *t-stat* e *P-value*, sendo que quanto maior o valor absoluto de *t-stat* e menor o valor de *P-value* mais sensível é o parâmetro (Abbaspour, 2015). Para a sua realização selecionaram-se os parâmetros tendo como base o desempenho do modelo inicial, onde se comparou a vazão simulada pelo modelo com os dados da bacia, conforme metodologia aplicada por Ferrigo (2014). Adicionalmente, considerou-se as diretrizes propostas por Abbaspour *et al.*, (2015) e pesquisa na literatura de modelagens realizadas para a Amazônia, como Abe *et al.*, (2018) e Santos *et al.*, (2018).

O modelo foi então executado 1000 vezes conforme proposto por Abbaspour *et al.*, (2015) e obteve-se assim os parâmetros mais sensíveis. Determinados os parâmetros mais sensíveis o modelo foi calibrado tendo como base os anos hidrológicos de 1984 a 2003, a partir de múltiplas simulações até que fosse obtido resultados satisfatórios de acordo com as métricas propostas por Moriasi *et al.*, (2007) e não se verificasse melhoras significativas nos resultados da função objetivo (Abbaspour *et al.*, 2015). Posteriormente realizou-se a etapa de validação, a partir de uma série

independente de dados que não foram utilizados na calibração, sendo assim, utilizou-se os anos hidrológicos de 2004 a 2013, aplicando-se os mesmos intervalos utilizados na calibração e 1000 interações (Abbaspour *et al.*, 2015).

Resultados

Análise de Sensibilidade, Calibração e Validação

Foram selecionados 18 parâmetros considerados como fundamentais nas correções e nos ajustes da modelagem inicial, sendo que para definição dos parâmetros mais sensíveis utilizou-se os anos hidrológicos de 1984 à 2003. Os resultados obtidos nesta etapa (Tabela 2) demonstram que a Fração de percolação do aquífero profundo (RCHRG_DP) foi o parâmetro mais sensível, sendo seguido por Curva-número na condição umidade média do solo (CN2) e Atraso da água subterrânea (GW_DELAY), enquanto que o Fator de compensação de absorção da planta (EPCO) e Albedo de solo úmido (SOL_ALB) foram os que apresentaram as menores sensibilidades para a presente modelagem.

A calibração do modelo foi realizada tendo como base os mesmos parâmetros utilizados na análise de sensibilidade (Tabela 4). Nesta etapa foram realizadas duas interações de 1000 simulações cada, correspondendo aos anos hidrológicos de 1984 a 2003. Determinou-se intervalos mínimos e máximos de variação de cada parâmetro, os quais se baseiam nos valores *defaults* de cada parâmetro no modelo e em valores obtidos junto a literatura. A Tabela 4 apresenta a relação dos parâmetros utilizados, o ranking de sensibilidade, intervalos mínimos e máximos adotados e o resultado obtido.

Tabela 4: Parâmetros selecionados de crescimento vegetal.

Sens	Parâmetro	Definição	Intervalo		Valor final
			Min	Max	
1	V_RCHRG_DP.gw	Fração de percolação do aquífero profundo	0	1	0,22
2	R_CN2.mgt	Curva-número na condição umidade média do solo	-0,2	0,2	-0,07
3	V_GW_DELAY.gw	Atraso da água subterrânea	0	450	46,73
4	R_SOL_AWC().sol	Capacidade de água disponível da camada de solo	-0,5	0,5	0,22
5	R_SOL_K().sol	Condutividade hidráulica saturada	-0,5	0,7	0,55
6	V_ALPHA_BF.gw	Fator alfa do fluxo de base	0	1	0,56
7	V_GW_REVAP.gw	Coeficiente de "revap" da água subterrânea	0,02	0,2	0,04
8	V_CANMX.hru_FRSE	Armazenamento máximo do dossel	0	40	17,92
9	V_CH_N2.rte	Valor "n" de Manning para o canal principal	0,02	0,2	0,09
10	V_CH_K2.rte	Condutividade hidráulica efetiva na aluvião do canal principal	0	130	4,13
11	V_ESCO.hru	Fator de compensação da evaporação do solo	0,01	1	0,29
12	V_REVAPMN.gw	Profundidade limite da água no aquífero raso para a ocorrência do "revap"	0	500	83,74
13	V_GWQMN.gw	A profundidade limite da água no aquífero raso necessária para que ocorra o fluxo de retorno	0	5000	4570,37
14	V_BIOMIX.mgt	Eficiência de mistura biológica	0,2	1	0,72
15	V_CANMX.hru_EUCA	Armazenamento máximo do dossel	0	30	4,21
16	V_SURLAG.bsn	Tempo de retardo do escoamento superficial	1	24	2,37
17	V_EPCO.hru	Fator de compensação de absorção da planta	0,01	1	0,69
18	R_SOL_ALB.sol	Albedo de solo úmido	-0,5	0,5	0,08

Fonte: Autoria própria.

Após a calibração realizou-se uma nova interação com 1000 simulações, tendo como base os anos hidrológicos de 2004 a 2013, utilizando o último intervalo mínimo e máximo da etapa de calibração, validando assim o modelo. Tanto a calibração quanto a validação foram realizadas baseadas em uma única simulação do modelo inicial, o qual foi dividido para a realização de ambas as etapas.

Os resultados estatísticos obtidos tanto para a calibração quanto para a validação, conforme avaliação proposta por Moriasi et al. (2007),

apresentaram um desempenho classificado como “muito bom” (Tabela 5). Esses resultados demonstram uma melhora significativa dos dados após a calibração e validação do modelo. Em relação às métricas estatísticas, que avaliam a força da calibração como *p-factor* e *r-factor*, os resultados apontam um desempenho muito adequado da calibração e validação do modelo, considerando valores recomendados (*p-factor* > 0.75 e *r-factor* < 1.5) (Abbaspour et al., 2015).

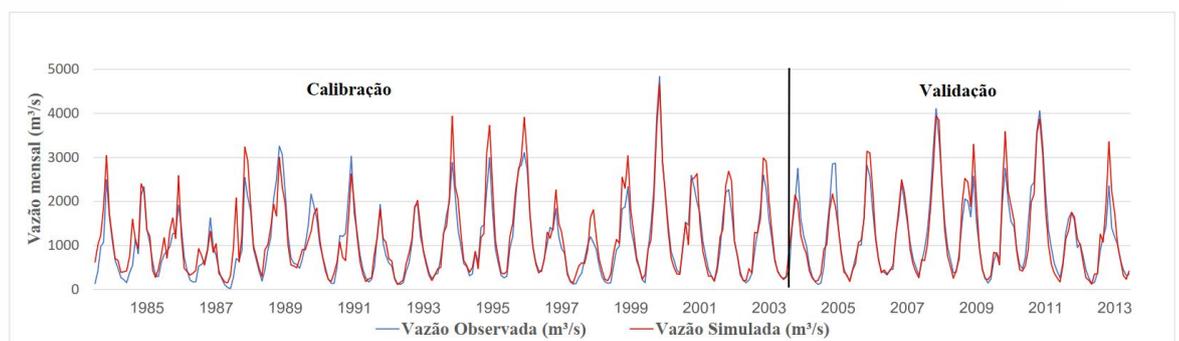
Tabela 5: Desempenho da Calibração e Validação.

Métricas	<i>p-factor</i>	<i>r-factor</i>	NS	RSR	PBIAS	R ²	bR ²
Calibração	0,84	0,84	0,85	0,39	-9,5	0,88	0,88
Validação	0,93	0,78	0,89	0,33	-0,6	0,90	0,9020
Classificação	--	--	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Bom	Bom

Fonte: Autoria própria.

Em relação ao hidrograma, a Figura 3 apresenta a vazão simulada pelo modelo após as etapas de calibração e validação. Pode-se observar-se que após a execução de ambas as etapas, o modelo representou de forma muito satisfatória a vazão simulada, a qual ficou bastante condizente com os dados observados na bacia, tanto em relação ao fluxo do período chuvoso quanto para o período de seca. Entretanto, pode-se notar que tal relação foi melhor representada no período de validação quando comparado com o período de calibração.

Figura 3: Hidrograma da vazão calibrado e validado versus observado.



Fonte: Autoria própria.

Discussão

Nos modelos hidrológicos, a parametrização é utilizada como forma de representar características específicas das bacias hidrográficas (Guse *et al.*, 2017), sendo que a principal fonte de erro em um modelo está associada à incerteza na determinação de seus parâmetros, devido ao descompasso entre a complexidade do modelo e os dados disponíveis, assim, a análise de sensibilidade auxilia na identificação dos parâmetros com maior efeito nos resultados do modelo (Devak; Dhanya, 2017).

No presente estudo, os parâmetros que se mostraram mais sensíveis estão associados aos fluxos subterrâneos, infiltração e escoamento superficial. Esses resultados estão em consonância com diversos estudos anteriores que também identificaram esses parâmetros como os mais influentes. Por exemplo, Schmalz e Fohrer (2009) e Lopes *et al.*, (2021) obtiveram conclusões semelhantes em suas pesquisas.

Schmalz e Fohrer (2009) realizaram um estudo em bacias hidrográficas localizadas no norte da Alemanha, mais especificamente nas bacias Stor, Treene e Kielstau. O objetivo desse estudo era investigar como as características específicas da paisagem influenciam no comportamento do modelo hidrológico. Durante a análise de sensibilidade, os autores identificaram que os parâmetros RCHRG_DP (recarga direta) e GW_DELAY (atraso na resposta do fluxo de água subterrânea) estavam entre os mais sensíveis. De acordo com os pesquisadores, uma das principais razões para essa sensibilidade é a predominância de planícies na região estudada, indicando a presença de fluxos de água como a infiltração e o fluxo de base.

Lopes *et al.*, (2021) tiveram por objetivo avaliar o comportamento hidrológico da bacia hidrográfica agrícola do Alto Teles Pires, localizada na região sul da Amazônia brasileira, e investigar o impacto da disponibilidade hídrica, bem como as consequências decorrentes das mudanças no uso e cobertura da terra nessa região. Os resultados obtidos revelaram que o modelo SWAT apresentou um ótimo desempenho, demonstrando sua

capacidade de reproduzir adequadamente o regime hidrológico mesmo em face da escassez de dados disponíveis para a bacia em questão. Dentre os parâmetros analisados, notadamente os parâmetros CN2 e GW_DELAY demonstraram alta sensibilidade aos processos hidrológicos observados na bacia.

Os resultados advindos das pesquisas em questão permitem ilustrar a significância de parâmetros associados aos fluxos subterrâneos e superficiais no âmbito da modelagem hidrológica. Através de análises detalhadas, tanto Schmalz e Fohrer (2009) quanto Lopes *et al.*, (2021) enfatizam a sensibilidade de variáveis tais como o GW_DELAY, que é um reflexo do atraso na reação do fluxo de água subterrâneo, sugerindo sua relevância e indispensabilidade para uma representação precisa dos processos hidrológicos. Ademais, o parâmetro CN2, igualmente, foi destacado por ambas as pesquisas como um elemento impactante na resposta do modelo. Resultados estes que enfatizam a relevância desses fatores hidrológicos, mesmo em bacia sob diferentes características e localizações geográficas.

Em relação à calibração, os resultados obtidos indicam que o conjunto de parâmetros selecionados para os procedimentos de calibração (Tabela 2) demonstrou um desempenho consistente, classificado como "muito bom" com base nas métricas estatísticas empregadas (NS, RSR, PBIAS, R^2 e bR^2). Essa avaliação é corroborada pela alta concordância observada entre os dados simulados e observados na bacia de estudo (Figura 3). Além disso, os resultados referentes ao fator p (p-factor) revelam que 84% e 93% dos dados observados encontram-se dentro da faixa de incerteza de 95% de previsão de propagação (95PPU), para as etapas de calibração e validação, respectivamente. Por sua vez, o fator r (r-factor) foi de 0,84 para a calibração e 0,78 para a validação, indicando uma menor incerteza associada ao modelo em termos de saídas simuladas. Esses resultados demonstram a robustez e

confiabilidade do modelo calibrado para representar o comportamento hidrológico na bacia de estudo.

Inúmeros trabalhos apresentam resultados satisfatórios para modelagens realizadas em território nacional (Andrade *et al.*, 2019; Fukunaga *et al.*, 2015; Silva *et al.*, 2018). Por exemplo, Andrade *et al.*, (2019) modelou a bacia do Rio Mundaú, localizada no Nordeste Brasileiro, com o objetivo de avaliar os efeitos do uso de conjuntos de dados de vazão e umidade do solo nas incertezas e previsões do modelo. Os resultados desse trabalho obtiveram para níveis mensais valores de NS, R² e PBIAS e índices *p-factor* e *r-factor* desempenhos “satisfatórios” e “muito bons”. Este resultado permite verificar que o modelo para a BHRJ está em conformidade com as modelagens realizadas em estudos nacionais, os quais apresentam resultados satisfatórios para a aplicação do SWAT na geração da vazão.

Em relação à Amazônia, os resultados também demonstram bons desempenhos para as bacias modeladas na região. Por exemplo, Serrão *et al.*, (2019) realizaram a simulação de processos hidrológicos e os impactos antrópicos na bacia hidrográfica do Rio Itacaiúnas, com uma área de 42.000 km², localizada no Estado do Pará, utilizando o modelo SWAT. Os resultados obtidos demonstram que o modelo SWAT foi capaz de simular adequadamente os processos hidrológicos, apresentando bons resultados nas etapas de calibração e validação do modelo, respectivamente.

Seguindo a mesma linha Santos *et al.*, (2018b) utilizaram o modelo SWAT para avaliar a futura conversão da floresta em pastagem e seus efeitos sobre a vazão e o balanço hídrico na bacia hidrográfica do rio Iriri, com uma extensão de 142.000 km². Os resultados desse estudo demonstram que o modelo SWAT foi eficiente na simulação da vazão e dos componentes do balanço hídrico da bacia, assim como nas simulações de impactos futuros decorrentes de alterações no uso e cobertura da terra. Além disso, essas alterações representam potenciais consequências tanto para a vazão quanto para o balanço hídrico.

Os resultados obtidos neste presente estudo, mostram-se estar em consonância com outras pesquisas realizadas em diversas regiões do Brasil, inclusive na Amazônia, evidenciando a adequação do modelo SWAT para a estimativa da vazão em diferentes contextos hidrológicos. Os estudos realizados na região amazônica também apresentaram resultados satisfatórios ao simular os processos hidrológicos e seus impactos, evidenciando a habilidade do modelo SWAT em lidar com mudanças no uso e cobertura do solo. Essas descobertas possuem relevância significativa no âmbito do entendimento e gestão dos recursos hídricos em distintas bacias hidrográficas.

Considerações Finais

A modelagem hidrológica foi realizada com a finalidade de avaliar a eficiência do SWAT em simular a vazão de uma bacia amazônica a partir da calibração pelo SUFI-2. Os resultados com base nas métricas estatísticas indicam um ajuste em termos de calibração e validação e que o modelo SWAT foi capaz de simular a vazão após a calibração com grande similaridade em relação aos dados observados na bacia, possibilitando, desta forma, a utilização do modelo SWAT como ferramenta de gestão para a BHRJ, para estudos posteriores de impactos relacionados a alterações ambientais (desmatamento e mudanças climáticas).

Agradecimento

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES

Referências Bibliográficas

ABBASPOUR, K. C. **SWAT-CUP: SWAT Calibration and Uncertainty Programs - A User Manual EAWAG**. Dübendorf, Switzerland. Eawag: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, 2015.

ABBASPOUR, K. C.; ROUHOLAHNEJAD, E.; VAGHEFI, S.; SRINIVASAN, R.; YANG, H.; KLØVE, B. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. **Journal of Hydrology**, v. 524, p. 733–752, 2015.

ABBASPOUR, K. C.; YANG, J.; MAXIMOV, I.; SIBER, R.; BOGNER, K.; MIELEITNER, J.; ZOBRIK, J.; SRINIVASAN, R. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. **Journal of Hydrology**, v. 333, n. 2–4, p. 413–430, 2007.

ABDULKAREEM, J. H.; PRADHAN, B.; SULAIMAN, W. N. A.; JAMIL, N. R. Review of studies on hydrological modelling in Malaysia. **Modeling Earth Systems and Environment**, v. 4, n. 4, p. 1577–1605, 2018.

ABE, C.; LOBO, F.; DIBIKE, Y.; COSTA, M.; DOS SANTOS, V.; NOVO, E. Modelling the Effects of Historical and Future Land Cover Changes on the Hydrology of an Amazonian Basin. **Water**, v. 10, n. 7, p. 932, 2018.

ALMEIDA, A. C. de; SOARES, J. V. Comparação entre uso de água em plantações de Eucalyptus grandis e floresta ombrófila densa (Mata Atlântica) na costa leste do Brasil. **Revista Árvore**, v. 27, n. 2, p. 159–170, 2003.

ANA. Agência Nacional de Águas. 2019. Disponível em: <<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/apresentacao>>. Acesso em: 05/08/2020.

ANDRADE, C. W. L. d.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; MONTENEGRO, A. A. A.; LIMA, J. R. d. S.; SRINIVASAN, R.; JONES, C. A. Soil moisture and discharge modeling in a representative watershed in northeastern Brazil using SWAT. **Ecohydrology and Hydrobiology**, v. 19, n. 2, 2019.

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. SWAT: Model use, calibration, and validation. **Transactions of the ASABE**, v. 55, n. 4, 2012.

ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R. S.; WILLIAMS, J. R. Large area Hydrologic Modeling and Assessment Part I: Model Development. **Journal of the American Water resources Association**, v. 34, n. 1, p. 73–89, 1998.

ARROIO JUNIOR, P. P. **Aprimoramento das Rotinas e Parâmetros dos Processos Hidrológicos do Modelo Computacional Soil and Water Assessment Tool - SWAT**. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos Centro de Recursos Hídricos e Estudos Ambientais Programa de Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

BALDISSERA, G. C. **Aplicabilidade do Modelo de Simulação Hidrológica SWAT (Soil And Water Assessment Tool), para a Bacia Hidrográfica do Rio Cuiabá / MT**.

Dissertação de Mestrado. Instituto de Ciências Exatas e da Terra. Programa de Pós Graduação em Física e Meio Ambiente. Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, 2005.

BRESSIANI, D. de A.; GASSMAN, P. W.; FERNANDES, J. G.; GARBOSSA, L. H. P.; SRINIVASAN, R.; BONUMÁ, N. B.; MENDIONDO, E. M. A review of soil and water assessment tool (SWAT) applications in Brazil: Challenges and prospects. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 8, n. 3, p. 1–27, 2015.

COSTA, N. L.; MAGALHÃES, J. A.; TOWNSEND, C. R.; PAULINO, V. T. Fisiologia e manejo de plantas forrageiras. **Embrapa Rondônia -Documentos 85**, n. February 2014, p. 32, 2004.

DEVAK, M.; DHANYA, C. T. **Sensitivity analysis of hydrological models: Review and way forward** *Journal of Water and Climate Change*. 2017.

DIAS-FILHO, M. B. Comunicado Técnico 235 - Formação e Manejo de Pastagens. **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA)**, p. 1–8, 2012.

DIAS, V. de S. **Simulação de vazão aplicada ao reservatório da UHE Furnas utilizando modelo SWAT**. Dissertação de Mestrado. Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, Goiânia, Pontifícia Universidade Católica de Goiás, 2017.

DUTTA, P.; SARMA, A. K. Hydrological modeling as a tool for water resources management of the data-scarce brahmaputra basin. **Journal of Water and Climate Change**, v. 12, n. 1, 2021.

EPE, E. de P. E. **Bacia Hidrográfica do Rio Jari – PA/AP: Estudos De Inventário Hidrelétrico Relatório Final**. 2011.

FARR, T. G.; ROSEN, P. A.; CARO, E.; CRIPPEN, R.; DUREN, R.; HENSLEY, S.; KOBRICK, M.; PALLER, M.; RODRIGUEZ, E.; ROTH, L.; SEAL, D.; SHAFFER, S.; SHIMADA, J.; UMLAND, J.; WERNER, M.; OSKIN, M.; BURBANK, D.; ALSDORF, D. The Shuttle Radar Topography Mission. **Reviews of Geophysics**, v. 45, n. 2, p. 1–33, 2007.

FEARNSIDE, P. M. The intrinsic value of Amazon biodiversity. **Biodiversity and Conservation**. 2021.

FERRIGO, S. **Análise de Consistência dos Parâmetros do Modelo Swat Obtidos por Calibração Automática – Estudo de Caso da Bacia do Lago Descoberto - DF**. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

FUKUNAGA, D. C.; CECÍLIO, R. A.; ZANETTI, S. S.; OLIVEIRA, L. T.; CAIADO, M. A. C. Application of the SWAT hydrologic model to a tropical watershed at Brazil. **CATENA**, v. 125, p. 206–213, fev. 2015.

FUNK, C.; PETERSON, P.; LANDSFELD, M.; PEDREROS, D.; VERDIN, J.; SHUKLA, S.; HUSAK, G.; ROWLAND, J.; HARRISON, L.; HOELL, A.; MICHAELSEN, J. The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. **Scientific Data**, v. 2, n. 1, p. 150066, 2015.

GASSMAN, P. W.; REYES, M. R.; GREEN, C. H.; ARNOLD, J. G. The Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, Applications, and Future Research

Directions. **Transactions of the ASABE, American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 50, n. 4, p. 1211–1250, 2007.

GUSE, B.; PFANNERSTILL, M.; GAFUROV, A.; KIESEL, J.; LEHR, C.; FOHRER, N. Identifying the connective strength between model parameters and performance criteria. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 21, n. 11, 2017.

JUNK, W. J.; SOARES, M. G. M.; BAYLEY, P. B. **Freshwater fishes of the Amazon River basin: Their biodiversity, fisheries, and habitats** Aquatic Ecosystem Health and Management. 2007.

KAMPF, S. K.; BURGESS, S. J. A framework for classifying and comparing distributed hillslope and catchment hydrologic models. **Water Resources Research**, v. 43, n. 5, 2007.

KRAUSE, P.; BOYLE, D. P.; BÄSE, F. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. **Advances in Geosciences**, v. 5, p. 89–97, 2005.

KUMMU, M.; GUILLAUME, J. H. A.; DE MOEL, H.; EISNER, S.; FLÖRKE, M.; PORKKA, M.; SIEBERT, S.; VELDKAMP, T. I. E.; WARD, P. J. The world's road to water scarcity: Shortage and stress in the 20th century and pathways towards sustainability. **Scientific Reports**, v. 6, 2016.

LATHUILLIÈRE, M. J.; COE, M. T.; JOHNSON, M. S. **A review of green-and blue-water resources and their trade-offs for future agricultural production in the Amazon Basin: What could irrigated agriculture mean for Amazonia?** **Hydrology and Earth System Sciences**. 2016.

LOPES, T. R.; ZOLIN, C. A.; MINGOTI, R.; VENDRUSCULO, L. G.; ALMEIDA, F. T. de; SOUZA, A. P. de; OLIVEIRA, R. F. de; PAULINO, J.; ULIANA, E. M. 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**, v. 108, 2021.

MAPBIOMAS. **Projeto MapBiomass**. 2019. Disponível em: <<https://mapbiomas.org/>>. Acesso em: 22/06/2020.

MCCUEN, R. H. **Hydrologic analysis and Design**. Upper Saddle River, New Jersey: Pearson Education, 1998. 1–833 p. 1998.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; LIEW, M. W. Van; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model Evaluation Guidelines For Systematic Quantification Of Accuracy In Watershed Simulations. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 3, p. 885–900, 2007.

MULLER, M. M. L.; GUIMARÃES, M. de F.; DESJARDINS, T.; MARTINS, P. F. da S. Degradação de pastagens na Região Amazônica: propriedades físicas do solo e crescimento de raízes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 11, p. 1409–1418, 2001.

NCAR. **National Centers for Environmental Prediction (NCEP)**. 2018. Disponível em: < <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/climate-forecast-system-version2-cfsv2> >. Acesso em: 23/05/2019.

NECHIFOR, V.; WINNING, M. Global economic and food security impacts of demand-driven water scarcity-alternative water management options for a thirsty world.

Water (Switzerland), v. 10, n. 10, 2018.

ROBERTS, J. M.; CABRAL, O. M. R.; COSTA, J. P. da; MCWILLIAM, A. L. C.; SÁ, T. . An overview of the leaf area index and physiological measurements during ABRACOS. *In*: GASH, J. H. C.; NOBRE, C. A.; ROBERTS, J. M.; VICTORIA, R. L. **Amazonian Deforestation and Climate**. New York: Wiley and Sons, p. 287–305, 1996.

ROSA, D. M. **Estrutura do Dossel e Sazonalidade do Índice de Área Foliar em Ambientes de Terra Firme na Amazônia Central, com Uso do Lidar Portátil Terrestre**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Ciências de Florestas Tropicais, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – INPA, Manaus, 2016a.

ROSA, D. R. Q. **Modelagem hidrossedimentológica na bacia hidrográfica do rio Pomba utilizando o SWAT**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016b.

SAMANTA, A.; KNYAZIKHIN, Y.; XU, L.; DICKINSON, R. E.; FU, R.; COSTA, M. H.; SAATCHI, S. S.; NEMANI, R. R.; MYNENI, R. B. Seasonal changes in leaf area of Amazon forests from leaf flushing and abscission. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 117, n. G01015, p. 1–13, mar. 2012.

SANTOS, Humberto Gonçalves; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. Á. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; FILHO, J. C. de A.; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, DF. Embrapa Solos, 2018a.

SANTOS, V. C. dos; LAURENT, F.; ABE, C.; MESSNER, F. Hydrologic Response to Land Use Change in a Large Basin in Eastern Amazon. **Water**, v. 10, n. 4, p. 429, 2018b.

SANTOS, R. S. .; OLIVEIRA, I. P.; MORAIS, R. F.; URQUIAGA, S. C.; BODDEY, R. M.; ALVES, B. J. R. Componentes da Parte Aérea e Raízes de Pastagens de *Brachiaria* spp. em Diferentes Idades Após a Reforma, como Indicadores de Produtividade em Ambiente de Cerrado. **Pesq Agropec Trop**, v. 37, n. 2, p. 119–124, 2007.

SCHMALZ, B.; FOHRER, N. Comparing model sensitivities of different landscapes using the ecohydrological SWAT model. **Advances in Geosciences**, v. 21, n. June 2014, p. 91–98, 2009.

SERRÃO, E. A. de O.; SILVA, M. T.; SOUSA, F. de A. S. de; LIMA, A. M. M. de; SANTOS, C. A. dos; ATAIDE, L. C. P. de; SILVA, V. de P. R. da. FOUR DECADES OF HYDROLOGICAL PROCESS SIMULATION OF THE ITACAIÚNAS RIVER WATERSHED, SOUTHEAST AMAZON. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 25, n. 3, p. 0–3, 2019.

SILVA, R. M. da; DANTAS, J. C.; BELTRÃO, J. D. A.; SANTOS, C. A. G. Hydrological simulation in a tropical humid basin in the cerrado biome using the SWAT model. **Hydrology Research**, v. 49, n. 3, p. 908–923, 2018.

SOLTANI, S. S.; ATAIE-ASHTIANI, B.; SIMMONS, C. T. **Review of assimilating GRACE terrestrial water storage data into hydrological models: Advances, challenges and opportunities**. *Earth-Science Reviews*. 2021.

Publisher

Universidade Federal de Goiás. Instituto de Estudos Socioambientais. Programa de Pós-graduação em Geografia. Publicação no Portal de Periódicos UFG.

As ideias expressadas neste artigo são de responsabilidade de seus autores, não representando, necessariamente, a opinião dos editores ou da universidade.

Contribuições dos autores

Todos os autores ofereceram substanciais contribuições científicas e intelectuais ao estudo. As tarefas de concepção e design do estudo, preparação e redação do manuscrito, bem como, revisão crítica foram desenvolvidas em grupo. O primeiro autor Paulo Ricardo Rufino ficou especialmente responsável pelo desenvolvimento teórico-conceitual, aquisição de dados e suas interpretações e análise, aplicação da metodologia, análise dos resultados e análise e desenvolvimento do texto. A segunda autora Francielle da Silva Cardozo, pelos procedimentos técnicos, revisão do texto e tradução do artigo. E o terceiro autor Gabriel Pereira, pela aquisição de dados e suas interpretações e análise, orientar o desenvolvimento do trabalho e revisão do texto. Declaramos ainda ciência das Diretrizes Gerais do BGG.

Paulo Ricardo Rufino, Geógrafo e mestre em geografia pela Universidade Federal de São João del Rei. Atualmente realiza Doutorado pelo Programa de Pós-Graduação em Geografia Física da USP, onde desenvolve pesquisa sobre modelagem hidrológica na região amazônica.

Francielle da Silva Cardozo, Possui graduação em Geografia pela Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC. É mestre em Geografia pela Universidade Federal de Santa Catarina. É doutora em Sensoriamento Remoto pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Possui Pós-Doutorado em Geografia pela Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ) onde trabalhou com a validação de modelos numéricos de qualidade do ar.

Gabriel Pereira, Possui graduação em Geografia pela Universidade do Estado de Santa Catarina, mestrado em Sensoriamento Remoto pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, doutorado em Geografia Física pela Universidade de São Paulo, doutorado em Sensoriamento Remoto pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais e pós-doutorado no Goddard Space Flight Center da National Aeronautics and Space Administration. Atualmente é professor da Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ) no departamento de Geociências (DEGEO).

Data de recebimento 05 de dezembro de 2023

Aceite em 18 de abril de 2024

Publicação em 22 de outubro de 2024