



JHONES DA SILVA AMORIM

**LONG-TERM HYDROLOGICAL MODELING IN THE
TOCANTINS RIVER BASIN UPSTREAM SERRA DA MESA
HYDROPOWER PLANT**

**LAVRAS – MG
2021**

JHONES DA SILVA AMORIM

**LONG-TERM HYDROLOGICAL MODELING IN THE TOCANTINS RIVER BASIN
UPSTREAM SERRA DA MESA HYDROPOWER PLANT**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, área de concentração em Hidrologia, para obtenção do título de Doutor.

Prof. Dr. Marcelo Ribeiro Viola
Orientador

**LAVRAS – MG
2021**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Amorim, Jhones da Silva.

Long-term hydrological modeling in the tocantins river basin
upstream serra da mesa hydropower plant/ Jhones da Silva Amorim.
- 2021.

130 p. : il.

Orientador(a): Marcelo Ribeiro Viola.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2021.
Bibliografia.

1. Satellite Precipitation Products. 2. Climate Reanalysis. 3.
Hydrological Modeling. I. Viola, Marcelo Ribeiro. II. Título.

JHONES DA SILVA AMORIM

**MODELAGEM HIDROLÓGICA DE LONGO TERMO NA BACIA
HIDROGRÁFICA DO RIO TOCANTINS À MONTANTE DA USINA
HIDRELÉTRICA DE SERRA DA MESA**

**LONG-TERM HYDROLOGICAL MODELING IN THE TOCANTINS RIVER BASIN
UPSTREAM SERRA DA MESA HYDROPOWER PLANT**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, área de concentração em Hidrologia, para obtenção do título de Doutor.

Aprovada em 16 de dezembro de 2021

Dr. Carlos Rogério de Mello UFLA

Dr. Benedito Cláudio da Silva UNIFEI

Dr. Junior Cesar Avanzi UFLA

Dr. Sly Wongchuig Correa Université Grenoble Alpes/IGE



Prof. Dr. Marcelo Ribeiro Viola
Orientador

**LAVRAS – MG
2021**

*Ao meu pai por viver o meu sonho, por sempre
pensar no melhor para mim e pelo amor imensurável.
À minha mãe por todo amor, carinho e cuidado.*

Dedico

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pela graça da vida, por ter abençoado cada passo dado durante a jornada, por iluminar meu caminho e por me encher de perseverança para atingir meu objetivo.

Aos meus pais, Josevalto e Norma, por serem meus exemplos de vida, por me ensinarem valores inegociáveis e pelo sacrifício que sempre fizeram, cada um à sua maneira, para que eu pudesse realizar meus sonhos. Obrigado por compreenderem minha ausência. Amo vocês!

À minha amada noiva Nicole, por todo companheirismo, cumplicidade e afeto dedicado. Por secar minhas lágrimas, segurar minha mão nos momentos mais turbulentos dessa trajetória e me dar tranquilidade para seguir em frente. Te amo!

À minha irmã Jamille, por suprir minha ausência para nossos pais, por torcer pela minha vitória. Essa conquista também é tua.

À minha família, em especial meu primo Natan pelo apoio e torcida.

Ao meu orientador, Marcelo Ribeiro Viola, pela orientação e acima de tudo pela confiança em mim depositada.

Aos amigos que o doutorado me deu: André; Jonas; Rubens; Vanessa; Vinicius; Renato; João Pedro; Giulia e Wendel. Vocês fizeram minha jornada muito mais alegre. Obrigado por toda ajuda e por escutarem minhas lamentações.

Aos professores, pelos ensinamentos e colaboração no meu processo de aprendizado, em especial o Prof. Carlos Rogério e o Prof. Gilberto Coelho.

À Flávia Mariani e Danilo Paulucio, por terem alicerçado meu caminho na pesquisa desde a iniciação científica e sobretudo pela amizade e torcida.

Aos irmãos de longa data Laurine, Devson, Rafael e Jorge, pela amizade, carinho e fraternidade.

À Universidade Federal de Lavras, pela infraestrutura e auxílio para realização e publicação desta pesquisa, ao Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e a todos os técnicos do Laboratório de Hidráulica pela disposição em ajudar na elaboração deste estudo.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal do Nível Superior (CAPES), pela bolsa de estudo (1748124 e 88882.446854/2019-01) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa de produtividade do orientador (308947/2018-5).

A todos que de alguma maneira contribuíram para a realização deste trabalho.

Meu sincero, MUITO OBRIGADO.

“Não é porque as coisas são difíceis que não arriscamos, é porque não arriscamos que elas se tornam difíceis”.

(Sêneca)

RESUMO

Os modelos hidrológicos são ferramentas importantes para a gestão dos recursos hídricos e sua aplicabilidade é diretamente limitada pela disponibilidade e qualidade das séries temporais de precipitação. A alta variabilidade espacial e temporal que a precipitação apresenta faz do seu monitoramento um desafio, especialmente em locais onde a rede de monitoramento é esparsa. Além disso, em áreas com relevância hidrológica e ecossistêmica, como o bioma Cerrado que é um dos *hotspots* mundiais, as séries temporais de precipitação confiáveis são ainda mais requeridas. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a aplicabilidade de produtos de precipitação obtidos a partir de diferentes metodologias para fins de modelagem hidrológica na bacia hidrográfica do Tocantins-Araguaia utilizando o modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT). Para isso, foram realizadas as seguintes análises: i) Calibração e validação de séries de precipitação estimada por satélites, ponto-a-pixel; ii) simulação de cenários futuros com parâmetros calibrados utilizando dados de precipitação interpolados; iii) simulação de uma longa série de vazão, denominada aqui de reanálise hidrológica, para o século 20 utilizando reanálises climáticas. O local do estudo está localizado no Cerrado com a seção de controle definida na usina hidrelétrica Serra da Mesa e abrange uma área de drenagem de 51.237 km². Os conjuntos de dados de precipitação avaliados foram: Produtos de Precipitação obtidos a partir de Satélites - PPS (TMPA e IMERG); Dados Observados Interpolados (DOI); e Reanálises Climáticas (ERA-20CM, ERA-20C e 20CRv3). A maior correlação e os menores erros entre os pluviômetros e os conjuntos de dados foram obtidos na escala mensal comparada à diária, na qual o PPS representou a precipitação mais adequadamente que os demais conjuntos de dados. Para a simulação de vazão mensal, os PPSs apresentaram resultados "muito bons" e o IMERG se destacou como um potencial substituto do TRMM para a modelagem hidrológica. A simulação de vazão do DOI foi a que apresentou os melhores índices estatísticos e seus parâmetros calibrados foram utilizados para simular os cenários futuros, tendo como dados de entrada os Modelos Climáticos Regionais Eta/HadGEM2-ES e Eta/MIROC5. Os resultados mostraram uma possível redução de até 70% na vazão para o final do século XXI, enquanto o escoamento médio anual poderá diminuir em 54% até 2040. Dentre as reanálises, o ERA-20CM apresentou os piores resultados, o que pode ser explicado pela ausência da assimilação de dados de observações. Embora o ERA-20C apresentou resultado superior ao ERA-20CM, o 20CRv3 foi a única reanálise capaz de simular satisfatoriamente a vazão no período de validação sendo utilizado para a reanálise hidrológica do século XX. De acordo com a análise de *Pettitt*, o principal ponto de mudança na série de vazão ocorreu na década de 1970 e a menor vazão média foi observada durante a primeira metade do século XX. A partir da reanálise hidrológica foram observados episódios de cheias e secas, no entanto outros eventos importantes não foram capturados. De maneira geral, PPS, DOI e o 20CRv3 apresentaram confiabilidade para serem usados como dados de entrada para os modelos hidrológicos e permitiram criar informações passadas e futuras, além de superar as limitações de cobertura espacial e temporal do monitoramento convencional.

Palavras-chave: Precipitação por Satélite. Mudanças Climáticas. Reanálises Climáticas. Simulação hidrológica. Grid de dados de precipitação interpolado.

ABSTRACT

Hydrological models are important tools for water resource management, and their applicability is directly constrained by the availability and quality of precipitation time series. The adequate precipitation measurement is challenging due to its spatial and temporal variability, especially where the monitoring network is sparse. Moreover, precipitation time series must be reliable in areas with hydrological and ecosystem relevance, such as the Cerrado biome, one of the world's hotspots. In this context, this study aimed to evaluate the applicability of precipitation products obtained from different methodologies for hydrological modeling purposes in the Tocantins-Araguaia watershed using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model. For this purpose, the following analyses were performed: i) Calibration and validation of satellite-estimated, point-by-pixel precipitation series; ii) simulation of future scenarios with calibrated parameters using interpolated precipitation data; iii) simulation of a long streamflow series, designated here as hydrological reanalysis, for the 20th century using climate reanalysis. The study site is located in the Cerrado with the control section defined at the Serra da Mesa hydroelectric power plant, comprising a drainage area of 51,237 km². The precipitation datasets evaluated were: Satellite Precipitation Products - SPP (TMPA and IMERG); Interpolated Observed Data (IOD); and Climate Reanalysis (ERA-20CM, ERA-20C, and 20CRv3). The highest correlation and lowest errors between rain gauges and datasets were obtained at the monthly scale compared to the daily scale, in which SPP represented precipitation more adequately than the other products. The SPPs showed "very good" results for the monthly streamflow simulation, and IMERG stood out as a potential substitute for the TRMM in hydrologic modeling applications. The streamflow simulation from the IOD was the one that presented the best statistical indexes, and thus its calibrated parameters were used for the simulation of future scenarios combined with the Regional Climate Models Eta-HadGEM-ES and Eta-MIROC5. The results showed a possible reduction of up to 70% in the streamflow for the end of the XXI century, while runoff could reduce 54% in the first time slice. ERA-20CM presented lower quality results among the reanalysis, explained by the absence of the data assimilation of observations. Although ERA-20C presented superior results to ERA-20CM, 20CRv3 was the only one capable of satisfactorily simulating the streamflow in the validation period and was used for the hydrological reanalysis of the 20th century. According to Pettitt's analysis, the main change point occurred in the 1970s, and the lowest average streamflow was observed during the first half of the 20th century. In the streamflow series derived from the hydrological reanalysis was identified extreme flood and drought events. However, some important events were not captured. Overall, SPP, IOD, and the 20CRv3 presented reliability as alternative input data for hydrological models and allowed to recreate past and future information besides overcoming the limitations of the spatial and temporal coverage of conventional monitoring.

Keywords: Satellite Precipitation Products. Climate Change. Climate Reanalysis. Hydrological Simulation. Interpolated Precipitation Dataset.

SUMÁRIO

	PRIMEIRA PARTE.....	1
1	INTRODUÇÃO	2
2	REFERÊNCIAL TEÓRICO	5
2.1	Modelagem Hidrológica.....	5
2.2	Soil and Water Assessment Tool.....	7
2.2.1	Calibração, Validação e Análise de Incerteza.....	10
2.3	Dados de Precipitação na Modelagem.....	12
2.3.1	Precipitação Estimada por Sensores a Bordo de Satélites.....	14
2.3.2	Tropical Rainfall Measuring Mission – TRMM.....	17
2.3.3	Integrated Multi-Satellite Retrievals for Gpm (IMERG).....	18
2.3.4	Reanálise Climática e Aplicações na Modelagem Hidrológica	19
2.3.5	Dados Interpolados de Precipitação	22
2.4	Bacia do Rio Tocantins-Araguaia	23
2.4.1	Serra da Mesa	25
3	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	27
	REFERÊNCIAS	28
	SEGUNDA PARTE.....	37
	ARTIGO 1 – EVALUATION OF SATELLITE PRECIPITATION PRODUCTS FOR HYDROLOGICAL MODELING IN THE BRAZILIAN CERRADO BIOME	38
	ARTIGO 2 – REANÁLISES CLIMÁTICAS DO SÉCULO XX APLICADAS A MODELAGEM HIDROLÓGICA NO CERRADO BRASILEIRO	57
	ARTIGO 3 – MODELING THE IMPACT OF PROJECTED CLIMATE CHANGE ON HYDROLOGY IN A DATA-SCARCE WATERSHED LOCATED IN THE BRAZILIAN TROPICAL SAVANNA	87

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO

A precipitação é um dos componentes do ciclo hidrológico que tem sido largamente estudado, seja para a gestão integrada dos recursos hídricos, irrigação ou sustentabilidade ecossistêmica (SHI; LI; WEI, 2017). Em decorrência das mudanças climáticas globais, a distribuição e o regime pluviométrico têm sofrido alterações que afetam a disponibilidade hídrica e os processos hidrológicos fortemente dependentes da precipitação (ASADI ZARCH; SIVAKUMAR; SHARMA, 2015; IPCC, 2014).

O estudo dos padrões espacial e temporal da precipitação é importante sob diferentes vieses hidrológicos (CABRAL et al., 2016). Entretanto, muitas vezes a distribuição espacial das estações de monitoramento não garantem a representatividade da região ou as séries históricas não apresentam qualidade adequada (NEZLIN; STEIN, 2005; SHI; LI; WEI, 2017). Além da qualidade, outro aspecto crítico é o tamanho da série histórica disponível o que dificulta, por exemplo, o desenvolvimento da modelagem contínua de longo prazo (DINKU et al., 2018; ORIANI et al., 2020). Essas limitações no monitoramento da precipitação estão relacionadas com o custo de implantação e manutenção dos equipamentos, o que torna esse problema ainda mais relevante em países em desenvolvimento.

Dados de precipitação confiáveis e de alta qualidade são imprescindíveis para a calibração dos modelos hidrológicos utilizados para o gerenciamento da produção de energia, avaliação de cenários de mudanças climáticas, entre outras finalidades (GU et al., 2010). Para contornar os problemas relacionados à disponibilidade de informações de precipitação *in-situ*, várias séries de dados alternativas têm sido desenvolvidas, tais como interpolação dos dados observados, produtos de precipitação obtidos por sensores remotos a bordo de satélites e as reanálises climáticas.

As técnicas de interpolação visam minimizar a baixa densidade das redes de monitoramento e capturar a distribuição espacial da precipitação (ZHANG et al., 2020). A utilização dos produtos interpolados na modelagem permite analisar a influência hidrológica da distribuição espacial da precipitação. No Brasil, um grid de dados diários interpolados com resolução de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ foi gerado por Xavier; King e Scanlon (2016) a partir de dados observados no período de 1980 a 2013.

Os dados de precipitação por satélite atualmente disponíveis por vezes apresentam resolução espacial e temporal superiores à da rede de monitoramento em superfície. Alguns exemplos destes tipos de dados são os consolidados do *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) (HUFFMAN et al., 2007) e os já disponibilizados do *Global Precipitation*

Measurement (GPM) (HOU et al., 2014). Apesar das vantagens apresentadas, a qualidade das estimativas da precipitação pode variar entre os locais de aplicação e épocas do ano (DINKU et al., 2008; HU et al., 2013; HUFFMAN et al., 2010; JIANG et al., 2010; WORQLUL et al., 2017). Sendo assim, a validação destes produtos tanto para o monitoramento da precipitação quanto para as simulações hidrológicas é fundamental para evitar erros nas tomadas de decisão, dimensionamento de obras, e análises de fenômenos climáticos.

As séries de dados de reanálises climáticas são obtidas pela conciliação de modelos climáticos globais, assimilação de dados e registros históricos disponíveis de algumas variáveis atmosféricas (DEE et al., 2014). Com esse procedimento é possível a geração de séries de dados de longo tempo de diversas variáveis atmosféricas na superfície terrestre e superfície do mar, com abrangência global, como são as ERA-20CM (HERSBACH et al., 2015), CFSR (SAHA et al., 2010) e JRA-55 (KOBAYASHI et al., 2015). Apesar de sua ampla utilização no campo da climatologia, a aplicação destes produtos na modelagem hidrológica ainda não tem sido amplamente estudada.

A modelagem hidrológica distribuída é um dos pontos chave para a realização de pesquisas relacionadas à compreensão da dinâmica hídrica, principalmente em bacias hidrográficas de grande escala (KAUFFELDT et al., 2013). O *modelo Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) tem sido largamente utilizado para pesquisas em diversas partes do mundo (HAJIHOSSEINI et al., 2016; SCHUOL; ABBASPOUR, 2007; SIDIKE et al., 2016). Trata-se de um modelo fisicamente baseado e que utiliza características de relevo, tipo de solo e uso e ocupação para realizar a simulação chuva-vazão, dentre outros.

Modelos como o SWAT são ferramentas úteis para auxiliar a gestão dos recursos hídricos em áreas com relevância hidrológica e ecossistêmica como o bioma Cerrado que possui uma grande biodiversidade, sendo fortemente afetado pela expansão das fronteiras agrícolas no Brasil (SILVA, 2018) o que faz deste bioma um dos *hotspots* mundiais da biodiversidade (MYERS et al., 2000). O Cerrado também tem papel importante na atenuação dos impactos das mudanças climáticas sobre a Amazônia, uma vez que o desflorestamento do Cerrado intensificaria a ocorrência e duração de secas no arco do desflorestamento ao sul da floresta (MALHADO; PIRES; COSTA, 2010). Do ponto de vista dos recursos hídricos, no Cerrado estão localizadas as regiões de cabeceiras de importantes bacias hidrográficas, tais como o São Francisco, Paraná e Tocantins (OLIVEIRA et al., 2019). No Cerrado também está localizado uma porção das áreas de drenagem do aquífero Guarani, o maior transfronteiriço aquífero da América do Sul (MACHADO; WENDLAND; KRAUSE, 2016). Tais características ressaltam a relevância de estudos visando o monitoramento hidrológico e conservação do bioma Cerrado.

No Cerrado estão localizadas as nascentes de importantes bacias hidrográficas, como a do Tocantins-Araguaia (BHTA). Com uma área de drenagem de aproximadamente de 764.000 km², que corresponde a cerca de 10% de todo o território nacional, a BHTA é de fundamental importância para a rede fluvial central do país (FALCK et al., 2015) e ganha destaque pelo potencial hidrelétrico instalado, com destaque para as UHE de Tucuruí, Lajeado, entre outras (LOUREIRO; FERNANDES, 2013). De acordo com Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2018), essas hidrelétricas juntas representam aproximadamente 15% da capacidade de geração hidrelétrica do Brasil.

Neste contexto, tendo como hipótese que os diversos produtos de precipitação podem ser utilizados junto com modelos hidrológicos para fundamentar a gestão dos recursos hídricos, simular vazão em cenários futuros ou em períodos passados, objetivou-se investigar a aplicabilidade de diferentes produtos de precipitação para a modelagem hidrológica conceitual contínua na região de cabeceira da bacia hidrográfica Tocantins-Araguaia. A presente tese está estruturada em duas partes. Na primeira parte consta o referencial teórico contendo informações que subsidiam o estudo. A segunda parte é formada por três artigos. No primeiro artigo foi avaliado a aplicação dos produtos de precipitação obtidos por satélites na simulação mensal da vazão. No segundo artigo, três reanálises climáticas foram utilizadas para simulação da vazão e aquela com melhor resultado foi utilizada para realizar a reanálise hidrológica para o século XX. Por fim, no terceiro artigo, foi investigado o potencial de dados interpolados para calibração e validação do modelo hidrológico para investigar os impactos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos no século XXI.

2 REFERÊNCIAL TEÓRICO

2.1 Modelagem Hidrológica

Um modelo representa um processo ou sistema com a finalidade de entendê-lo e obter resultados para uma variação nos dados de entrada (TUCCI, 2005). Segundo Devia, Ganasri e Dwarakish (2015), o melhor modelo é aquele fornece o resultado mais representativo com a menor quantidade de parâmetros e complexidade.

Atualmente existe uma vasta quantidade de modelos hidrológicos disponíveis. Os modelos são aplicados aos mais diferentes sistemas, naturais ou artificiais. Na modelagem hidrológica chuva-vazão o sistema estudado é a bacia hidrográfica e há a representação dos fenômenos do ciclo hidrológico por equações matemáticas (TUCCI, 2005). Arnold *et al.* (1998) relataram a aplicabilidade dos modelos hidrológicos no planejamento integrado dos recursos hídricos e, de acordo com Devia, Ganasri e Dwarakish (2015), os modelos hidrológicos são considerados importantes e necessários para a gestão de recursos hídricos e ambiental.

Tucci (2005) aponta que a heterogeneidade física das bacias e dos processos hidrológicos é responsável pelo desenvolvimento dos diversos tipos de modelos. Os primeiros modelos hidrológicos abordavam os processos do ciclo hidrológico de forma individualizada, como a dinâmica da infiltração da água no solo por Horton em 1933 (HORTON, 2014). Impulsionado pela evolução computacional e disponibilidade de dados, diversos modelos surgiram desde então. Neste contexto é importante conhecer os modelos de acordo com suas características.

Uma das mais importantes classificações subdivide os modelos quanto à formulação em empíricos e conceituais. Os empíricos são baseados em dados provenientes de experimentos acerca de determinados processos sob condições específicas. Eles envolvem equações matemáticas derivadas de séries temporais e não consideram os processos físicos (DEVIA; GANASRI; DWARAKISH, 2015). Os modelos conceituais, por sua vez, consideram a descrição dos processos físicos, como o modelo da infiltração proposto por Philip (1957). Tucci (2005) subdivide este grupo em: semi-conceituais, para o qual apesar de haver descrição física dos processos, há certo grau de empirismo relacionado com a utilização de parâmetros calibráveis; e fisicamente baseados, que buscam representar fielmente o comportamento físico do sistema.

Como o sistema hidrológico é bastante complexo e não uniforme, a representação da variabilidade espacial dos fenômenos dentro da bacia hidrográfica se torna um desafio. O

avanço na capacidade de processamento dos computadores na década de 1990 viabilizou a subdivisão da bacia com o objetivo de obter a melhor descrição da variabilidade espacial, nos chamados modelos distribuídos. Quando não considera a subdivisão da bacia, a modelagem é dita concentrada.

Os modelos hidrológicos podem ainda ser classificados em determinísticos e estocásticos. Enquanto o primeiro apresenta uma única solução para um conjunto de dados de entrada, o segundo pode apresentar diferentes respostas para uma única entrada em função da componente aleatória (CALDEIRA et al., 2018).

Devido a capacidade de representar o comportamento hidrológico de bacias hidrográficas, os modelos se tornaram ferramentas úteis para vários tipos de análises hidrológicas. Para tanto, os dois principais conjuntos de dados de entrada em modelos hidrológicos consistem das variáveis meteorológicas e dos mapas de solos, vegetação e modelo digital de elevação (DEVIA; GANASRI; DWARAKISH, 2015). A depender da estrutura matemática e do objetivo do modelo, uma maior quantidade de informação de entrada pode ser requerida.

Existem inúmeras aplicações de modelos hidrológicos ao redor do mundo. Blainski, Acosta e Nogueira (2017) aplicaram o modelo SWAT no estudo da vazão e descarga de sedimentos em uma bacia hidrográfica em Santa Catarina. Monte *et al.* (2016) propuseram a combinação de um modelo hidrológico com um modelo hidráulico para mapear as áreas de inundações no município de Rio Largo – Alagoas. Righetto *et al.* (2016) utilizaram a modelagem hidrológica para simular uma bacia de retenção urbana e infiltração em reservatório em Natal, Rio Grande do Norte, Brasil. Alfaro, Liesch e Goldscheider (2017) utilizaram o MODFLOW para caracterizar o sistema e água subterrânea e o balanço hídrico no sul do vale do Jordão, além de simular cenários com diferentes condições hidrológicas.

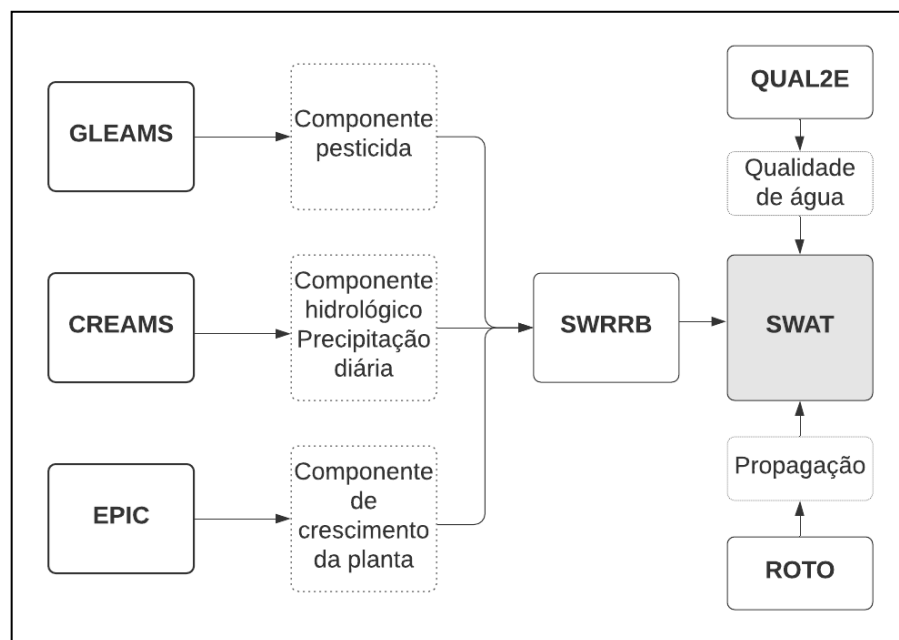
Dentre os modelos desenvolvidos no Brasil, o Modelo de Grandes Bacias do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (MGB-IPH) (COLLISCHONN et al., 2007) tem apresentado bons resultados em simulações da vazão em grandes bacias hidrográficas, tais como Amazonas (CORREA et al., 2017; PAIVA et al., 2013), Grande (NÓBREGA et al., 2011) e Tocantins (JIMÉNEZ; COLLISCHONN; PAIVA, 2019). O modelo conceitual *Lavras Simulation of Hydrology* (LASH) foi desenvolvido pela Universidade Federal de Lavras e Universidade de Purdue em 2008 e desde então tem passado por melhorias, como a implementação de um módulo de calibração automática. O LASH tem sido aplicado para avaliar impactos das mudanças climáticas e do uso e ocupação do solo sobre os processos hidrológicos (MELLO et al., 2021; VIOLA et al., 2014; 2015).

2.2 Soil and Water Assessment Tool

O modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) foi desenvolvido pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), ligado ao Serviço de Pesquisas Agrícolas (ARS). O SWAT é resultado da integração de vários outros modelos, a saber o *Simulator for Water Resources in Rural Basins* (SWRRB), *Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems* (CREAMS), *Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems* (GLEAMS) e *Erosion-Productivity Impact Calculator* (EPIC), conforme apresentado na Figura 1. A primeira versão do SWAT foi desenvolvida no início da década de 1990, e desde então vem passando por sucessivos aprimoramentos.

Os principais objetivos do desenvolvimento do SWAT foram o estudo do impacto hidrossedimentológico e o carreamento de fertilizantes decorrentes das alterações no uso do solo. Trata-se de um modelo matemático de simulação contínua, semi-conceitual, semi-distribuído e que pode ser aplicado em diferentes passos de simulação (ARNOLD et al., 2012).

Figura 1 – Modelos que foram agregados na criação do SWAT.



Fonte: Adaptado de Gassman et al. (2007).

O SWAT utiliza as informações topográficas oriundas do Modelo Digital de Elevação (MDE) para delimitar a bacia hidrográfica e criar a hidrografia. Posteriormente, a bacia é subdividida em múltiplas sub-bacias conectadas pela rede de drenagem. Essa divisão é relativamente complexa, uma vez que as sub-bacias podem apresentar propriedades físico-hídricas distintas que impactam de forma diferente na hidrologia (NEITSCH et al., 2009).

Em seguida, as sub-bacias são discretizadas em Unidades de Resposta Hidrológica (em inglês *Hydrologic Response Units* — URH), que consistem em áreas onde o comportamento hidrológico é homogêneo. A adoção da simulação com URHs permite uma maior representatividade espacial dos processos hidrológicos o que atribui maior segurança aos parâmetros ajustados e menor extrapolação de valores (ARNOLD et al., 2012; GASSMAN et al., 2007; NEITSCH et al., 2009). No SWAT a discretização da área em URHs pode ser realizada a partir de três critérios distintos, sendo: classes de solo, declividade e uso do solo predominantes; URH predominante; e URH múltiplas (ARNOLD et al., 2012). Um exemplo da importância da representatividade espacial dos processos foi evidenciado por Bueno *et al.* (2017) que avaliaram o efeito de cada critérios de criação das URHs na simulação hidrológica do rio Grande, sudeste do Brasil, e obtiveram melhor desempenho para URHs múltiplas.

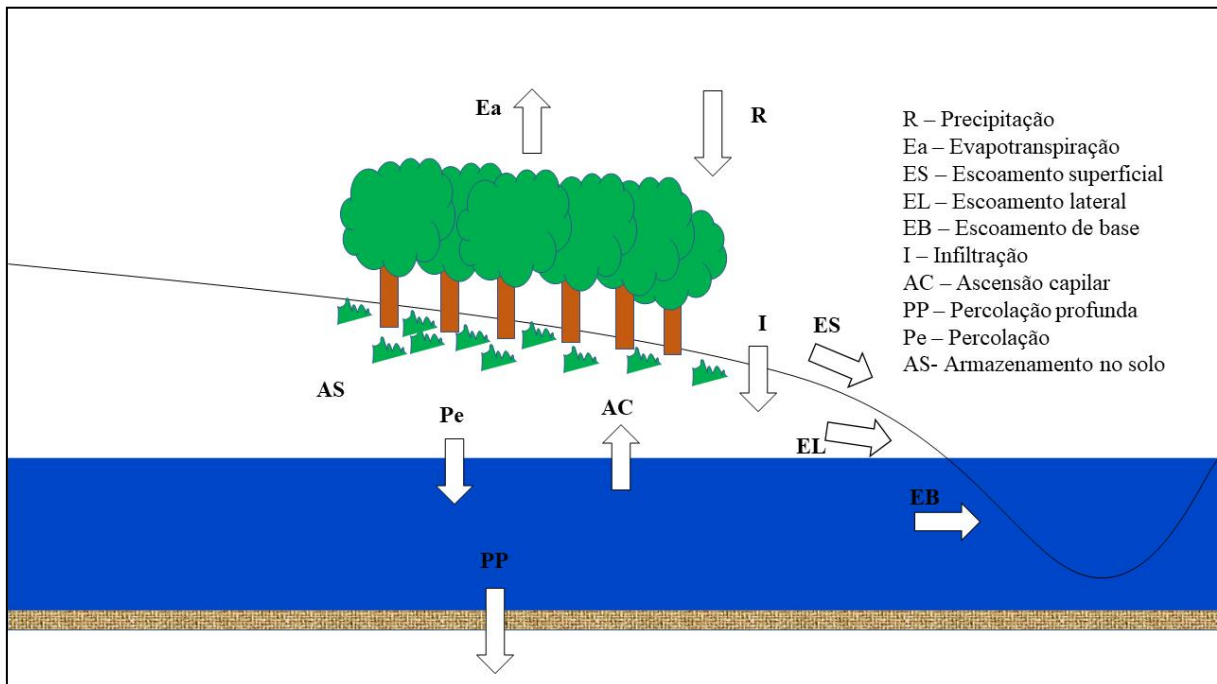
O balanço hídrico (1) rege a simulação hidrológica no SWAT. Os principais componentes do ciclo hidrológico (Figura 2) são simulados em duas etapas. A primeira é a fase terrestre do ciclo hidrológico, na qual os componentes são computados a partir do balanço hídrico. A segunda é a fase de propagação do escoamento na rede de drenagem até a seção de controle, a qual pode ser realizada por meio dos métodos do armazenamento não linear ou *Muskingum-Cunge* (NEITSCH et al., 2009).

$$AS_t = AS_0 + \sum_{i=1}^t (P_{\text{day},i} - E_{\text{surf},i} - E_{a,i} - W_{\text{seep},i} - E_{\text{gw},i}) \quad (1)$$

em que: AS_t é a lâmina final armazenada no solo (mm); AS_0 é a lâmina inicial armazenada no solo dia i (mm); $P_{\text{day},i}$ é a lâmina precipitada no dia (mm); $E_{\text{surf},i}$ é o escoamento superficial direto no dia i (mm); $E_{a,i}$ é a evapotranspiração no dia i (mm); $W_{\text{seep},i}$ é a lâmina que sai da camada inferior do perfil do solo no dia i (mm); e $E_{\text{gw},i}$ é o escoamento base no dia i (mm).

A fase terrestre inicia-se com a ocorrência da precipitação. Parte da água precipitada é interceptada e fica disponível para evaporação (NEITSCH et al., 2009). A outra parcela da precipitação atinge a superfície do solo e pode infiltrar ou escoar superficialmente. A infiltração pode ser diretamente simulada no SWAT utilizando o método de *Green e Ampt* (GREEN; AMPT, 1911). Entretanto, este método requer dados de entrada sub-diários, os quais são escassos. Outra forma de obtenção da lâmina de água entrando no perfil do solo é, indiretamente, por meio da diferença entre a precipitação que atingiu o solo e o escoamento superficial direto. Nesta abordagem, o escoamento superficial direto é calculado pelo método Curva Número (CN) do *Soil Conservation Services* (USDA, 1972).

Figura 2 – Componentes do ciclo hidrológico simulados pelo SWAT.



Fonte: Do Autor (2021).

A água que esco superficialmente atinge rapidamente a rede de drenagem, enquanto a parcela que infiltrou pode compor a evapotranspiração, o escoamento lateral (subs superficial), ficar armazenada no solo e a recarga de aquíferos (livre ou confinado) (NEITSCH et al., 2009). O SWAT permite o cálculo da evapotranspiração por três métodos e a escolha depende dos dados meteorológicos disponíveis: *Priestley e Taylor* (PRIESTLEY; TAYLOR, 1972); *Hargreaves* (HARGREAVES, 1975); e *Peanman-Montheit* (MONTEITH, 1965;PENMAN, 1956). Os dados do posto de monitoramento mais próximo do centroide de cada sub-bacia são utilizados para o cálculo da evapotranspiração (MONTEIRO et al., 2016).

Dados referentes ao tipo e uso do solo da bacia hidrográfica também são requeridos para a simulação da vazão com o SWAT (NEITSCH et al., 2009). Essas informações são inseridas na base de dados do modelo e a distribuição espacial das classes de solo e do uso do solo são fornecidas a partir de mapas temáticos.

O SWAT tem sido amplamente aplicado no Brasil e no mundo. Bressiani *et al.* (2015) traz estudos desenvolvidos em diversas bacias hidrográficas no Brasil utilizando o SWAT. Especificamente para o bioma Cerrado, Oliveira *et al.* (2019) aplicaram o modelo SWAT para avaliar o impacto das mudanças climáticas sobre a vazão e transporte de sedimentos na bacia hidrográfica do Alto Paranaíba e obtiveram resultados úteis para os serviços ecológicos e hidrológicos do Cerrado. Rodrigues *et al.* (2019) investigaram o efeito das mudanças climáticas sobre o regime hidrológico e secas em três bacias hidrográficas localizadas no Cerrado e

mostraram que a duração, intensidade e frequência das secas aumentarão em períodos futuros. Silva *et al.* (2018) avaliaram a aplicabilidade do SWAT no Cerrado e obtiveram resultados que reforçam a utilização do modelo como ferramenta de gestão dos recursos hídricos na região.

2.2.1 Calibração, Validação e Análise de Incerteza

A calibração de um modelo pode ser definida como a etapa na qual busca-se minimizar a diferença entre os dados simulados e observados de forma que os processos físicos sejam adequadamente representados (ABBASPOUR; VAGHEFI; SRINIVASAN, 2018). Este procedimento está intimamente relacionado com as incertezas do modelo as quais devem ser reduzidas ao fim desta etapa. Durante a calibração, o modelador visa a obtenção dos valores para os parâmetros calibráveis a partir da variável de saída do modelo. Essa variável depende do objetivo do estudo e pode ser vazão, descarga de sedimentos, nutrientes, dentre outros.

A primeira etapa da calibração do modelo hidrológico corresponde a análise de sensibilidade (ARNOLD *et al.*, 2012). Esta consiste na identificação dos parâmetros que exercem maior influência sobre o resultado da modelagem. A análise de sensibilidade pode ser realizada de duas formas: variando um parâmetro por vez e analisando seu respectivo efeito sobre a saída do modelo ou função objetivo (em inglês *one-at-a-time* — OAT); ou permitindo a variação de todos os parâmetros ao mesmo tempo (em inglês *all-at-a-time* — AAT). Ambas metodologias podem apresentar resultados diferentes e indicarem variação na sensibilidade dos parâmetros (ARNOLD *et al.*, 2012). O OAT possui a vantagem de ser mais rapidamente executado e a principal desvantagem consiste no fato que a sensibilidade de um parâmetro quase sempre depende dos demais (ABBASPOUR; VAGHEFI; SRINIVASAN, 2018). A fixação dos valores exatos dos demais parâmetros não são conhecidos o que pode limitar a utilização do OAT (ARNOLD *et al.*, 2012). Caldeira *et al.* (2018) afirmam que os resultados da OAT têm maior nível de incerteza, pois não são capazes de explicar a não linearidade e a não-monotonicidade do parâmetro. Apesar de considerar a dependência entre os parâmetros, o AAT possui como principal desvantagem o grande número de simulações necessárias para a obtenção do resultado, o que pode limitar sua aplicação (ARNOLD *et al.*, 2012).

De acordo com Abbaspour, Vaghefi e Srinivasan (2018), a análise de sensibilidade é importante para identificar os processos hidrológicos mais importantes que ocorrem na bacia e reduzir a quantidade de parâmetros no processo de calibração a partir da eliminação dos que são menos sensíveis. Neste sentido, a análise de sensibilidade é de notória importância na redução da super parametrização (em inglês *overparametrization*). Da visão estatística, super parametrização é definida como a inclusão de informações redundantes que leva a uma matriz

de covariância que não pode ser invertida (WHITTAKER et al., 2010). Em modelos hidrológicos, a super parametrização ocorre quando a quantidade de informações inerentes a variável de saída não é capaz de estimar uma grande quantidade de parâmetros. Um exemplo apresentado por Her e Chaubey (2015) é a utilização da vazão na saída da bacia como única variável observada para a calibração de todos os parâmetros envolvidos nos processos hidrológicos. Assim, uma super parametrização pode acarretar em um modelo super ajustado (em inglês *overfitted*) e uma solução não única (WHITTAKER et al., 2010).

Um modelo é dito super configurado quando considera os ruídos dos dados de entrada durante o procedimento de calibração e resulta em poucos erros nesta etapa, mas grandes desvios quando utilizados em período diferente da calibração, como na validação ou predição (WHITTAKER et al., 2010). Desta forma, os valores dos parâmetros obtidos na calibração não são confiáveis. Por sua vez, uma solução não única está relacionada ao conceito de equifinalidade que é uma propriedade da modelagem inversa (ABBASPOUR, 2015), na qual o ponto de partida é a variável resposta e os parâmetros que configuram os processos são o objetivo da calibração. Tal aspecto pode gerar mais de uma solução para o problema.

De acordo com Beven (2006), a equifinalidade refere-se à representação de um modelo a partir de diferentes configurações, ou seja, mais de um conjunto de valores aceitáveis dos parâmetros que não podem ser facilmente rejeitadas e que devem ser consideradas na avaliação da incerteza. A equifinalidade somente seria inevitável se existisse um modelo totalmente físico que descrevesse todos os detalhes dos processos hidrológicos envolvidos na simulação. A equifinalidade é mais acentuada em modelos distribuídos, como no caso do SWAT (HER; CHAUBEY, 2015).

Após a análise de sensibilidade e identificação dos parâmetros a serem ajustados, a realização da calibração permite atribuir valores aos parâmetros de complexa mensuração, seja devido ao alto custo, escala de medição, naturezas não físicas, entre outros (ABBASPOUR; JOHNSON; VAN GENUCHTEN, 2004; ABBASPOUR; VAGHEFI; SRINIVASAN, 2018; HER; CHAUBEY, 2015). A principal dificuldade da calibração é encontrar uma solução única para os parâmetros que melhor represente os dados e processos que ocorrem na bacia (ABBASPOUR; JOHNSON; VAN GENUCHTEN, 2004) uma vez que pode haver outras soluções tão boas quanto, dado o conceito de equifinalidade. Isto está relacionado ao fato de que a obtenção dos parâmetros hidrológicos a partir da modelagem inversa contém incertezas relacionadas com erros de medição, modelos conceituais, condição de contorno, entre outros (ABBASPOUR; JOHNSON; VAN GENUCHTEN, 2004).

Abbaspour (2015) aponta duas abordagens para calibração: determinística e estocástica. A determinística resulta em um único valor para cada parâmetro, como no caso da calibração por tentativa e erro. Na calibração estocástica, o ajuste dos parâmetros é realizado considerando todas as fontes de incertezas e seu resultado consiste em uma faixa de valores para cada parâmetro. De acordo com Abbaspour *et al.* (2015), a calibração estocástica reúne todas as incertezas dos modelos conceituais utilizados, das simplificações adotadas na modelagem, dos dados observados, entre outros, nas faixas ajustadas para os parâmetros.

A partir da calibração estocástica é possível realizar a análise de incerteza da modelagem. A análise de incerteza é importante para avaliar a qualidade da calibração (ABBASPOUR *et al.*, 2015) e dar suporte à tomada de decisão (YANG; REICHERT; ABBASPOUR, 2007).

O algoritmo *Sequential Uncertainty Fitting version 2* (SUFI-2) (ABBASPOUR; JOHNSON; VAN GENUCHTEN, 2004) disponível no software SWAT-CUP tem sido utilizado para realizar a análise de incerteza do modelo SWAT. As incertezas são quantificadas nos níveis de 2,5% e 97,5% de uma distribuição cumulativa de frequência de todos os valores simulados a partir de uma amostragem do hipercubo latino. O intervalo compreendido entre esses valores é referido como 95% de incerteza de predição (95PPU) (ROUHOLAHNEJAD *et al.*, 2014).

A validação é realizada executando o modelo com o conjunto de parâmetros ajustados para um período diferente da calibração. Desta maneira é possível avaliar o desempenho do modelo em condições diferentes daquelas previamente conhecidas por ele e verificar a robustez dos resultados. O resultado da análise de incerteza nesta etapa corresponde à incerteza inerente ao período de validação.

2.3 Dados de Precipitação na Modelagem

A medição direta da precipitação em postos de monitoramento na superfície terrestre é realizada por meio de equipamentos como pluviômetros e pluviógrafos. O primeiro é um equipamento de baixo custo constituído de uma superfície de captação e reservatório para acúmulo da água coletada, sendo a lâmina total precipitada o quociente do volume armazenado pela área de captação. Os pluviógrafos permitem a medição da intensidade de precipitação a partir de um dispositivo analógico ou digital que registra o comportamento da precipitação ao longo do tempo (MELLO; SILVA, 2013).

Apesar de propiciarem medições diretas, pluviômetros e pluviógrafos possuem representatividade espacial limitada devido à área de amostragem consideravelmente reduzida.

Também há que se considerar o processo de evaporação e, especificamente para o pluviógrafo, a possibilidade de subestimativa dos eventos máximos devido às limitações mecânicas (TAPIADOR et al., 2012). Somado a isso, tem-se a ação do vento que é o principal causador de erros nas medições (NEŠPOR; SEVRUK, 1999).

A rede de monitoramento meteorológico brasileira sob responsabilidade do INMET possui 400 estações. De acordo com o inventário de 2018, a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), é responsável por 2.767 postos de monitoramento de precipitação no Brasil. Além destas instituições tem-se ainda as empresas ligadas à Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) que fazem gestão das usinas hidrelétricas, o Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN) e outras agências que monitoram a precipitação.

Desta forma, o Brasil conta com uma considerável rede de monitoramento. Entretanto, levando em consideração as dimensões continentais do país e a distribuição irregular dos postos de monitoramento, há dificuldade de disponibilidade de dados em algumas bacias hidrográficas brasileiras. Em algumas regiões em que há monitoramento as séries históricas são curtas e impossibilita o uso para a modelagem hidrológica contínua (MONTEIRO et al., 2016). Apesar das limitações, os pluviômetros continuam sendo a fonte mais confiável de monitoramento da precipitação (CABRAL; SAKURAGI; SILVEIRA, 2017).

Outro instrumento utilizado para monitorar a precipitação são os radares meteorológicos. A estimativa da localização e intensidade da precipitação por radar meteorológico se expandiu a partir da década de 1940 (MUNCHAK, 2018). Radares meteorológicos estimam a precipitação de forma contínua no tempo e espaço. Este procedimento é fundamentado nas medições indiretas (reflexão do pulso de energia eletromagnética emitido por uma antena) e têm diversas fontes de incerteza, tais como a calibração dos equipamentos, atenuação devido à umidade ou neve, dentre outros (MELLO e SILVA, 2013). Além da pequena quantidade de radares disponíveis, a conversão da refletividade em estimativa quantitativa da precipitação a uma certa altitude e distância do radar é complexa devido à distribuição do tamanho das gotas, atenuação da radiação, curvatura da Terra, dentre outros, levando a propagação de erros anômalos e comprometendo as estimativas das taxas de precipitação (HOU et al., 2014; PRIGENT, 2010).

Devido aos altos custos de manutenção e acessibilidade a cobertura por radares meteorológicos sobre oceanos e áreas remotas são baixas (MUNCHAK, 2018). Desta forma, Kidd e Levizzani (2011) afirmam que, em escala global, uma descrição abrangente da

precipitação tanto na superfície terrestre como sobre os oceanos poderá ser alcançada a partir de um ponto de vista do espaço, ou seja, por meio de sensores a bordo de satélites.

2.3.1 Precipitação Estimada por Sensores a Bordo de Satélites

A medição direta da precipitação em um determinado local utilizando instrumentos de superfície é relativamente simples (HOU et al., 2014). Entretanto, a grande variabilidade espacial e temporal faz da medição em superfície uma tarefa desafiadora ao longo do globo, principalmente na superfície dos oceanos e áreas mais remotas (HOU et al., 2014; HUFFMAN et al., 2007).

As limitações das medições da precipitação em superfície apresentadas na seção anterior e o avanço no sensoriamento remoto por satélite proporcionam uma grande oportunidade para a estimativa remotamente da precipitação (MISHRA et al., 2011). Os sensores a bordo de satélites são caracterizados por suprir a necessidade de medições com alta frequência e grande abrangência espacial (KIDD; LEVIZZANI, 2011) sendo uma alternativa para superar as limitações das medições em superfície. Atualmente existem diversos produtos de precipitação baseados em satélite, tais como: *Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks* (PERSIANN), *Climate Prediction Center (CPC) MORPHing technique* (CIMORPH), *Tropical rainfall measuring mission Multi-satellite Precipitation Analysis* (TMPA) e o *Global Precipitation Measurement* (GPM).

Prigent (2010) afirma que a utilização de satélites é uma solução, pois apresenta uma alta resolução espacial, precisão adequada e curto tempo de revisitação. Assim como os demais instrumento de medição da precipitação, os sensores a bordo dos satélites não são isentos de erros aleatórios e causados por fatores como a frequência de amostragem, o campo de visão não uniforme dos sensores e as incertezas dos algoritmos de recuperação de chuva (CHANG; CHIU, 1999).

Os satélites que levam os sensores a bordo podem ser separados quanto à sua órbita em geoestacionária e baixa. Aqueles com órbita geoestacionária, ou geossíncrona, orbitam a Terra com elevação aproximada de 36.000 km e velocidade angular igual à do planeta. Tais características permitem que os sensores a bordo destes satélites colem várias informações de uma mesma área com alta resolução temporal (KIDD; LEVIZZANI, 2011). Os satélites em órbita baixa, ou polares, estão a uma elevação de aproximadamente 900 km em direção próxima a norte-sul (JIMÉNEZ, 2017), fornecendo duas ou mais passagens pelo Equador no mesmo dia. Devido à reduzida elevação, produtos de sensores a bordo desses satélites apresentam uma resolução espacial consideravelmente alta (KIDD; LEVIZZANI, 2011).

De acordo com Jimenez (2017), por meio dos processos de reflexão, espalhamento e absorção, ocorre a interação entre a radiação que viaja através da atmosfera com as moléculas suspensas. Esta interação resulta em alterações energéticas que são detectadas pelos sensores que utilizam as bandas espectrais das faixas do visível (VIS), infravermelho (IR) e micro-ondas (MO), e a precipitação estimada por meio de algoritmos matemáticos (GU et al., 2010).

As técnicas que utilizam o VIS e IR são baseadas nas características de refletividade e temperatura do topo das nuvens, respectivamente (SALIO et al., 2015). Na estimativa a partir do VIS, as nuvens apresentam maior brilho comparado com a superfície terrestre em função do seu albedo e essa característica é relacionada com sua espessura (KIDD; LEVIZZANI, 2011).

De acordo com Kidd e Levizzani (2011), a estimativa da precipitação utilizando apenas o VIS é pobre, conseqüentemente as observações devem ser utilizadas em conjunto com outros comprimentos de onda. Somado a isso, têm-se a limitação da utilização do VIS no fim do dia e durante a noite (TAPIADOR et al., 2012), já que o brilho na faixa do VIS é dependente do ângulo de inclinação solar (VARMA, 2018).

Os métodos baseados no IR observam a relação da temperatura do topo das nuvens com sua altura e espessura. A premissa física é que a temperatura do topo da nuvem é um indicativo da altura e que os topos das nuvens mais altos e mais frios resultantes de convecção mais forte produzem mais chuva (VARMA, 2018). Os sensores IR possuem vantagens de fornecer alta resolução temporal, quando a bordo de satélites geoestacionários, e cobertura espacial quase global (HOBOUCHIAN et al., 2017; SALIO et al., 2015; TAPIADOR et al., 2012). Características das partículas do topo da nuvem, como tamanho e estado físico, podem ser estimados a partir do IR próximo e o IR termal utilizado para estimar a precipitação em função da temperatura do topo das nuvens durante dia e noite (KIDD; LEVIZZANI, 2011).

Os valores de IR sofrem efeito da época do ano e local de estimativa, uma vez que a relação estatística entre a temperatura do topo das nuvens e precipitação é dependente da localização e estação do ano (TAPIADOR et al., 2012). Outros problemas relacionados ao método de IR são as nuvens não precipitantes com o topo frio, que podem ser erroneamente interpretadas como um evento de precipitação, e o fato de uma precipitação nem sempre ser decorrente de uma nuvem fria, como observa-se em eventos convectivos em regiões tropicais (HOUZE JUNIOR, 1994).

Uma melhoria na estimativa da precipitação a partir do IR se dá pela utilização de múltiplas bandas na faixa do IR (TAPIADOR, 2018) e também pela utilização de clusters que consideram o raio das nuvens (TAPIADOR et al., 2012). Tanto os métodos utilizando o VIS

como IR são tidos como mais incertos, uma vez que a radiação nessa faixa não penetra nas nuvens (VARMA, 2018).

Estimativas mais diretas da precipitação a partir de satélites podem ser geradas utilizando a faixa do espectro eletromagnético correspondente à MO (TAPIADOR, 2018). Os métodos baseados na MO apresentam bases físicas mais robustas, sendo sensíveis à concentração de partículas de gelo ou gotículas associadas à precipitação (*hydrometeor*) (KIDD et al., 2003; VARMA, 2018). As principais desvantagens desses métodos são: a baixa resolução espacial, devido ao grande comprimento de onda; e temporal, por estarem a bordo de satélites em órbita baixa (VARMA, 2018). De acordo com Huffman *et al.* (1995), os sensores de MO podem não ser feitos em tamanho adequado para satélites geoestacionários, por isso são utilizados naqueles de órbita baixa.

As variações na radiação que são registradas pelos sensores são decorrentes do processo de emissão, absorção ou espalhamento realizado pelas partículas precipitáveis nos comprimentos de onda na faixa entre 10 e 95 GHz, embora outros comprimentos de onda possam ser eventualmente utilizados (KIDD; LEVIZZANI, 2011; TAPIADOR et al., 2012). Os processos observados na estimativa da precipitação a partir da MO são: a emissão pelas gotículas de chuva, que aumentam a radiação MO; e o espalhamento causado pelas partículas de gelo, o que diminui a radiação MO (KIDD; LEVIZZANI, 2011). Os sensores de MO podem ser passivos ou ativos. Quando medem a radiação líquida no topo da atmosfera são denominados passivos (MOP). Por sua vez, os sensores de micro-ondas ativos (MOA) medem a energia que retorna a partir de um pulso emitido (KIDD; LEVIZZANI, 2011; TAPIADOR, 2018).

Dentre os atuais sensores de MOP utilizados na estimativa da precipitação estão os radiômetros *Defense Meteorological Satellite Program* (DMSP), *Special Sensor Microwave Imager* (SSM/I), *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM), *Tropical Microwave Imager* (TMI), *Global Precipitation Measurement* (GPM) e *Global Microwave Imager* (GMI) (VARMA, 2018). Sensores de MOA que trouxeram mudanças à observação da precipitação do espaço foram o *TRMM Precipitation Radar* (TRMM-PR) (HUFFMAN et al., 2007) e o *GPM Dual-Frequency Precipitation Radar* (GPM-DPR) (HOU et al., 2014). Munchak (2018) afirma que tanto a missão TRMM como GPM foram concebidas para, além da estimativa da precipitação, criar uma base de dados unificada de precipitação.

Como visto, todas as técnicas utilizadas apresentam pontos positivos e negativos, levando ao entendimento que não há uma única técnica capaz de fazer isso com perfeição (HUFFMAN et al., 1995). A combinação entre os métodos utilizando IR, VIS e MO foi então

vista como uma alternativa capaz de reunir estimativas mais diretas da MO com as melhores amostragem do IR/VIS resultando em um produto que apresentam resultados mais confiáveis em melhores resoluções espacial e temporal (TAPIADOR et al., 2012).

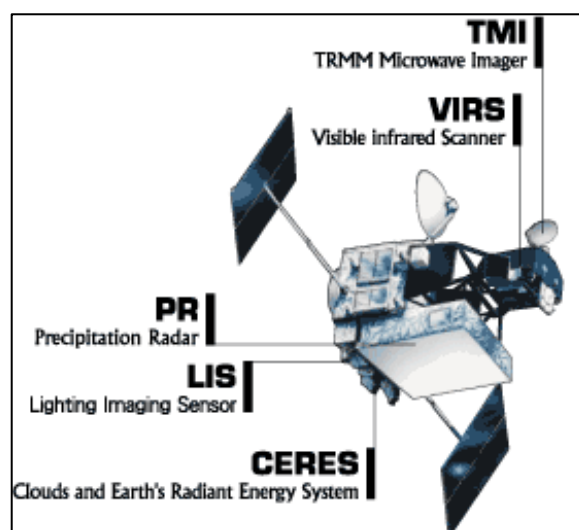
2.3.2 Tropical Rainfall Measuring Mission – TRMM

Um dos principais satélites utilizados para estimativa da precipitação por meio do sensoriamento remoto é o *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM). Ele é resultado da parceria entre a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) e *Japan Aerospace Exploration Agency* (JAXA) e foi lançado em novembro de 1997. Possui órbita baixa (400 km) (TAO et al., 2016) e inclinação de 37° com o plano do equador (MISHRA et al., 2011). O principal objetivo do TRMM é a estimativa da precipitação e da troca de energia (calor latente) em regiões tropicais e subtropicais no mundo (KUMMEROW et al., 1998).

O TRMM carrega a bordo instrumentos como sensores para MO, VIS, IR e radar meteorológico. A resolução espacial e temporal dos produtos TRMM é considerada relativamente alta devido à baixa órbita do satélite e ao período de translação curto (91 min) (COLLISCHONN; COLLISCHONN; TUCCI, 2008).

Os instrumentos disponíveis no TRMM (Figura 3) são os radiômetros imageadores de MO (TMI), radar de precipitação (PR), sistema radiométrico de visível e infravermelho (VIRS), os sensores de energia radiante da superfície terrestre e das nuvens (CERES) e para imageamento de relâmpagos (LIS) (KUMMEROW et al., 1998). O TMI é o principal instrumento utilizado na medição da precipitação, por sua vez o PR é utilizado no refinamento das estimativas (COLLISCHONN; COLLISCHONN; TUCCI, 2008).

Figura 3 – Instrumentos disponíveis no TRMM utilizados para a medição da precipitação



Fonte: Disponível em <https://pmm.nasa.gov/TRMM/trmm-instruments>.

No processo de medição da precipitação, o TMI fornece o produto final da interação das nuvens com a energia radiante, mas não consegue apresentar informação mais específica da altura das nuvens. O PR estima a altura das nuvens com base na defasagem de tempo entre a radiação enviada e recebida pelo radar resultante do processo de espalhamento realizado pelas partículas precipitantes. O PR também fornece informações 3D das nuvens, mais especificamente o perfil vertical (KUMMEROW et al., 1998). O VIRS é responsável pelas informações complementares do topo da nuvem e agrega maior resolução temporal às medições, tanto a bordo do TRMM como em satélites geoestacionários

O produto TRMM *Multisatellite Precipitation Analysis* (TMPA) é uma série de dados com alta resolução temporal e espacial. O TMPA fornece dados da intensidade pluviométrica a cada 3 horas com resolução de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ graus, estendendo-se de 50° S a 50° N no sistema de coordenadas WGS-1984. Os dados variam desde observações sub-diárias, disponibilizadas de seis a nove horas após o evento, até escala mensal, calculados 15 dias após o final do mês, ambas com a mesma resolução espacial (HUFFMAN et al., 2007). O TMPA foi projetado para combinar medições de múltiplos satélites e calibrá-las com dados de pluviômetros superfície em busca da melhor estimativa da precipitação.

A versão final do TMPA (HUFFMAN et al., 2007) recomendada para fins de pesquisa é obtida em quatro etapas: as estimativas de precipitação por MO dos diversos satélites em órbita baixa são calibradas e combinadas; as estimativas de precipitação de IR são criadas a partir da precipitação por MO obtidas na etapa anterior; combinação dos produtos de MO e IR; e; para os produtos mensais, os dados do pluviômetro são integrados.

Apesar de todo sucesso para estimativas de intensidade pluviométrica, devido a alguns problemas o TRMM entrou na atmosfera terrestre em junho de 2015. Contudo, com objetivos de continuar o monitoramento iniciado com o TRMM foi lançado em 2014 o satélite GPM (*Global Precipitation Measurement*). Ele possui área de cobertura expandida para além dos trópicos, abrangendo praticamente todo o globo. A partir dos dados do GPM as informações do TRMM foram ampliadas por meio de alterações em seus algoritmos até o final de 2019 para tornar possível a validação do satélite mais antigo.

2.3.3 Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG)

Em decorrência dos bons resultados obtidos com o TRMM, o *Global Precipitation Mission* (GPM) “core” foi lançado em 2014 em parceria da NASA e JAXA dando início a uma nova era na estimativa da precipitação a partir de satélite. O GPM é uma constelação de satélites

que fornece os produtos de precipitação com resolução espacial de $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ e temporal de meia hora (HOU et al., 2014).

GPM apresenta três melhorias técnicas significativas em comparação com o TRMM: aumento na inclinação orbital de 35° para 65° , proporcionando a cobertura de importantes zonas climáticas; atualização do radar para duas frequências (bandas Ka e Ku, entre 27 e 40 GHz e entre 10.7 GHz e 18 GHz, respectivamente); e inclusão de canais de alta frequência a partir do radiômetro GPM *microwave imager* (GMI), que fornece informações importantes para detecção de precipitação no estado sólido (HUFFMAN et al., 2019). Dentre os produtos oferecidos a partir do GPM tem-se o *Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM* (IMERG).

O IMERG é projetado para compensar a baixa frequência dos sensores passivos de micro-ondas a bordo dos satélites em órbita baixa (PRAKASH et al., 2018). Isso é possível devido à combinação da maior quantidade de satélites de micro-ondas com os sensores de infravermelho a bordo dos satélites em órbita geocêntrica com frequência temporal maior. Além dessa combinação, a utilização dos dados de precipitação do *Global Precipitation Climatology Centre* (GPCC) para correção do viés torna esses produtos mais confiáveis.

O principal objetivo do IMERG é calibrar, mesclar e interpolar as informações de precipitação estimada a partir de sensores de micro-ondas passivas em diversos satélites, dos medidores de precipitação e de outras fontes de dados de precipitação para as referidas escalas espaciais e temporais (HUFFMAN et al., 2019). O IMERG é ofertado em três configurações: o *Early*, disponível após aproximadamente 4h; o *Late*, disponibilizado aproximadamente 14h da observação; e o *Final*, que combina os dados de satélite com os dados de superfície e é liberado após aproximadamente 3 meses e meio após a observação.

O IMERG, principalmente na versão final, tem sido utilizado como alternativa para os dados meteorológicos convencionais que são requeridos pelos modelos hidrológicos como o SWAT. A resolução espacial apresentada pelo IMERG poderá suprir a baixa densidade de pluviômetros em bacias hidrográficas estratégicas do ponto de vista hidrológico, ecossistêmico e socioeconômico.

2.3.4 Reanálise Climática e Aplicações na Modelagem Hidrológica

A melhoria na descrição da circulação atmosférica global em decorrência do progresso constante dos métodos numéricos possibilitou o desenvolvimento das reanálises climáticas. Os dados de reanálise são resultado do reprocessamento de observações de várias fontes de medição, em campo ou de sensoriamento remoto, por meio de modelos de previsão atmosférico

global e fornecem informações sub-diárias das condições atmosféricas e da superfície terrestre para vários anos (REICHLE et al., 2017).

O reprocessamento consistente das observações meteorológicas arquivadas ocorre utilizando um moderno modelo climático (DEE et al., 2014). A ideia principal é utilizar o modelo de previsão em intervalos curtos e realizar iterações até que os resultados sejam consistentes com as observações. Por meio da representação fisicamente baseada nas equações que descrevem o movimento e energia da atmosfera, os modelos de previsão fornecem dados com homogeneidade espacial e temporal que agregam alta qualidade às observações (TAPIADOR et al., 2012).

Conforme Fujiwara *et al.* (2017), após o modelo climático global propagar informações no tempo e no espaço, as saídas e os dados observados utilizados são combinados em um esquema de assimilação de dados buscando a melhor estimativa do estado passado da atmosfera, atribuindo pesos tanto às saídas dos modelos como observações para produzir análises subsequentes do estado atmosférico, os quais serão utilizados para as previsões adicionais. Segundo Liu *et al.* (2012), a assimilação do resultado produzido pelo modelo de previsão com os dados observados independentes é capaz de aumentar a acurácia da predição.

Os principais produtos da reanálise são as estimativas de diversas variáveis atmosféricas, da superfície do mar e terrestre, disponibilizadas em conjuntos de dados abrangendo várias décadas em formato de dados do tipo matriz. Os conjuntos de dados de reanálise tem sido desenvolvidos por diversos institutos ao redor do mundo. Segundo Fujiwara *et al.* (2017), os três principais esforços para a criação de reanálises foram iniciados na década de 1980, com o *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP), o *National Aeronautic and Space Agency* (NASA) e a *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF). Dee *et al.* (2014) destacam que o Primeiro Experimento Atmosfera Global (FGGE) foi um dos responsáveis pelos avanços em sistemas de observação global, metodologias de assimilação de dados e melhores modelos de previsão.

Fujiwara *et al.* (2017) classificam as reanálises climáticas em função do tipo de dados observados utilizados em completas, convencionais e de superfície. As reanálises completas são aquelas que são assimilados todos os dados disponíveis como dados de superfícies, do ar superior e de satélites. Quando não os dados observados de satélites não são assimilados, a reanálise é definida como convencional. As reanálises de superfícies assimilam dados convencionalmente observados na superfície tais como pressão na superfície e ventos marinhos.

A precisão espacial das reanálises em determinada região varia de acordo com as fontes de dados e métodos de assimilação de dados utilizados (SIDIKE et al., 2016). Além disso, a

aplicação das reanálises na área da hidrologia era limitada devido às baixas resoluções espacial e temporal das séries de dados, incertezas e viés que acarretavam as saídas dos modelos (ALFIERI et al., 2020). Com o avanço na qualidade dos produtos de reanálise climática espera-se que a aplicação na hidrologia seja mais abrangente e que os resultados permitam o entendimento de eventos por meio de um maior período de observação.

O conjunto de dados de reanálise do séc. XX da *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), denominado de ERA-20CM, será utilizado neste estudo. O ERA-20CM é um dos primeiros projetos para reanálise do século passado e faz parte da iniciativa ERA-CLIM financiada pela União Europeia e realizada por um consórcio de oito parceiros da Europa e um do Chile (HERSBACH et al., 2015).

O ERA-20CM é gerada por meio do *Integrated Forecasting System* (IFS) versão Cy38r1 e sua versão final foi lançada em 2014 (HERSBACH et al., 2015). É composta por um *ensemble* de 10 membros que utilizam a forçante radiativa CMIP5, sendo que, cada membro é gerado por uma realização das temperaturas da superfície do mar (TSM) e gelo marinho (SIC) obtidos a partir do HadISST2 (TITCHNER; RAYNER, 2014). Desta forma, cada membro possui uma condição inicial diferente resultando em respostas diferentes, o que permite analisar a incerteza do modelo de reanálise.

Os dados são disponibilizados na página do ECMWF (<https://apps.ecmwf.int/datasets/data/era20cm-daily/levtype=sfc/>) e abrangem o período de 1900 a 2010. Dentre as diversas variáveis disponibilizadas está o total precipitado acumulado em três horas em nível de superfície com resolução espacial de $0,125^\circ \times 0,125^\circ$.

Um dos relevantes estudos hidrológicos realizados no Brasil utilizando dados de reanálise climática foi desenvolvido por Correa *et al.* (2017). O principal objetivo dos autores foi desenvolver uma metodologia que possibilitasse a criação de dados históricos de vazão na bacia do rio Amazonas para avaliar eventos de seca e cheia, sendo a metodologia denominada de Retrospectiva Hidrológica. Para criação desta série os autores utilizaram o modelo hidrológico MGB-IPH e oito series de dados de precipitação com mais de 30 anos (1981 – 2010) oriundos de reanálises climáticas (ERA-Interim, ERA-20CM, CFSR, JAR-55 e NOAAv2c) e da combinação dos dados de reanálises climáticas consistentes com dados observados (CHIRPS v2.0, ERA-Interim Land e MSWEP). A partir de métricas estatísticas, os autores concluíram que os melhores resultados foram obtidos com as séries de precipitação que combinam os dados de reanálise com os observados em pluviômetros. Foi concluído que a metodologia é capaz de representar eventos de secas e cheias na bacia do rio Amazonas conseguindo identificar eventos que não foram monitorados. Em estudo mais recente,

CORREA *et al.* (2019) realizaram a reanálise hidrológica com série de dados mais recentes, como o ERA-20CM. A partir de metodologias de remoção de viés da forçante de chuva e de assimilação de dados de series extensas de vazão na Amazonia, foi possível simular a vazão na bacia Amazônica para todo o século XX.

Assim, os modelos hidrológicos forçados com os dados provenientes das saídas das reanálises climáticas, definidas por diversos autores como reanálise hidrológica, são grandes alternativas para compreender o comportamento hidrológico tanto do passado como do presente.

2.3.5 Dados Interpolados de Precipitação

A interpolação dos dados de precipitação desempenha um papel importante para as regiões com baixa densidade de postos de monitoramento. Por meio dos interpoladores é possível estimar a precipitação em locais com ausência de dados e reduzir a quantidade de equipamentos requeridos para a medição. O método mais apropriado para interpolação dos dados varia para cada região devido a variabilidade espacial (ALVES; VECCHIA, 2011) e a qualidade da interpolação depende da densidade e distribuição dos pontos usados no cálculo (SILVA *et al.*, 2012).

Como visto anteriormente, uma grande quantidade de produtos de precipitação tem sido lançada recentemente. Entretanto, dados medidos em superfícies são necessários para validar esses produtos (XAVIER, KING; SCANLON, 2016). Neste sentido, os dados interpolados podem ser utilizados para tal fim, além de serem utilizados para a remoção de viés em dados de modelos climáticos globais e regionais.

Outra característica dos produtos interpolados é a disponibilidade de produto com alta resolução espacial. Essa característica é principalmente desejada para a aplicação do modelo hidrológico distribuído SWAT. Uma vez que as informações climáticas atribuídas para cada sub-bacia são provenientes da estação mais próxima do respectivo centroide, a utilização de dados de uma rede de monitoramento esparsa pode acarretar no uso de informações destoantes do local de estudo. Bases de dados de precipitação interpolada de qualidade podem superar essa limitação por meio da estimativa da precipitação condizente ao local de estudo.

Um produto interpolado que tem sido utilizado no Brasil foi disponibilizado por Xavier, King e Scanlon (2016). Esses dados estão acessíveis no formato grid com resolução espacial de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$, escala de tempo diária com abrangência em todo o Brasil. O produto foi gerado a partir da avaliação de seis diferentes métodos de interpolação aplicados à 3.625 pluviômetros e 735 estações meteorológicas para o período de 1980 a 2013. O Inverso do Quadrado da

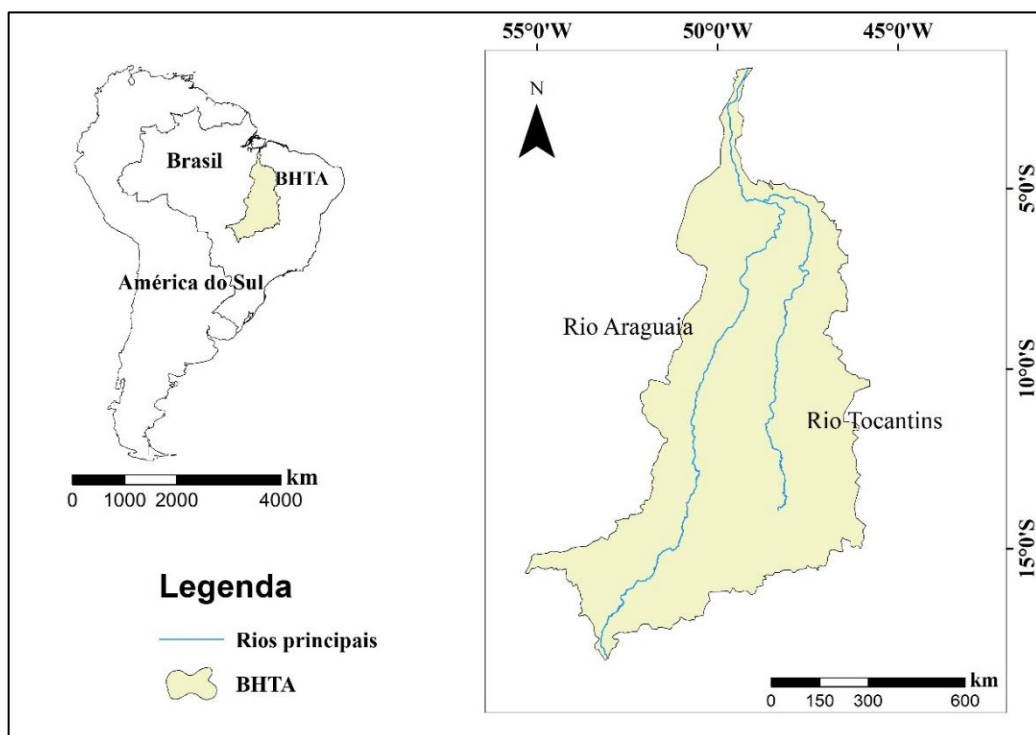
Distância (IQD) e a Distância Angular Ponderada (DAP) foram os que apresentaram os melhores resultados, sendo a precipitação interpolada por meio do IQD. Os dados estão disponibilizados na página <https://utexas.box.com/Xavier-et-al-IJOC-DATA>.

A utilização do produto desenvolvido por Xavier, King e Scanlon (2016) tem sido realizada em alguns estudos no Brasil. Alvarez-Dias *et al.* (2020) utilizaram a base de dados para eventos climáticos extremos no Brasil. Melo *et al.* (2015) estudaram a ligação entre as secas meteorológicas e hidrológicas na bacia hidrográfica do rio Paraná. Apesar de ser utilizada para a modelagem hidrológica (SOUZA *et al.*, 2020), a análise desta base de dados no bioma Cerrado ainda permanece como uma lacuna.

2.4 Bacia do Rio Tocantins-Araguaia

Com aproximadamente 10,8% do território nacional e 920 mil km², a Bacia Hidrográfica Tocantins-Araguaia (BHTA) tem grande importância para a economia brasileira. Além do notório potencial hidrelétrico e fluvial com 2.400 km de canais navegáveis, a BHTA tem potencial para se tornar uma importante hidrovia para transporte dos produtos da região Centro-Oeste do Brasil (MONTEIRO *et al.*, 2016). A área da BHTA abrange os estados do Pará (30%), Tocantins (30%), Goiás (21%), Mato Grosso (15%), Maranhão (4%) e Distrito Federal (0,1%) (ANA, 2015) (Figura 4).

Figura 4 – Bacia hidrográfica Tocantins-Araguaia.



Fonte: Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico (2015).

A precipitação média anual para a BHTA é de 1.869 mm/ano (FALCK et al., 2015). A vazão média anual é de 13.779 m³/s e a vazão específica é de 15,1 L/s/km² (ANA, 2015). Por estar situada entre as regiões amazônica e nordeste, é influenciada pela zona de convergência intertropical, linhas de instabilidade, sistemas frontais e zona de convergência do Atlântico Sul (JIMENES, 2017).

De acordo com Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o potencial hidrelétrico aproveitado na região é de 13,14 GW, o que representa 15% da capacidade produtiva do país (ANEEL, 2018). Atualmente na região estão instaladas e em operação nove Usinas Hidrelétricas (UHE) e 27 Pequenas Centrais hidrelétricas (PCH). Com a UHE do Estreito, no Rio Tocantins, a partir de 2013 o potencial hidrelétrico aproveitado aumentou em 135,9 MW. Dados divulgados pela Eletrobrás apontam a bacia hidrográfica do Tocantins como a terceira em produção de energia, ficando atrás apenas do Amazonas e Paraná (ANA, 2015).

As maiores cheias na BHTA apresentaram níveis de 14,47 m (1978), 14,45 m (1979), 17,42 m (1980) e 14,40 m (1990) m com base nas estações fluviométricas instaladas no rio Tocantins (Marabá e Carolina) e Araguaia (Conceição do Araguaia) (CÂMARA et al., 2016). A bacia do rio Tocantins, na qual estão localizadas as hidrelétricas da BHTA, tem enfrentado eventos de seca, como abordado por Junqueira *et al.* (2020). Uma vez que dados hidrológicos anteriores à metade do século XX são raros na BHTA, como observado por Câmara *et al.* (2016), ressalta-se a importância da investigação da variabilidade hidrológica de longo termo na região.

A BHTA é a maior bacia totalmente inserida no Brasil. Sua área está compreendida nos biomas Cerrado e Amazônia. A vegetação predominante em 51% da área é a savana (cerrado), seguida pela floresta ombrófila com 16% de abrangência (MONTEIRO et al., 2016). No alto curso prevalece o bioma Cerrado, enquanto no baixo curso predomina o bioma Amazônia, sendo observados ainda ecótonos Amazônia-Cerrado e Cerrado-Caatinga, esta última na porção nordeste (MMA, 2006).

A fragilidade do bioma Cerrado, um *hotspot* mundial, é outro aspecto que justifica a demanda por pesquisas que auxiliem à gestão adequada dos recursos naturais na BHTA. O bioma cerrado possui grande biodiversidade com cerca de 1.268 espécies de vertebrados, dos quais 117 são endêmicos, e a cada 100 km² há ocorrência de 1,2 plantas endêmicas Myers *et al.* (2000). Apesar da relevância ambiental, o Cerrado enfrenta conflitos relacionados à expansão da fronteira agrícola. Com a expansão da agricultura brasileira na década de 1970 ocorreu também a maior ocupação do Cerrado. Pereira *et al.* (2020) trouxeram estudos que atrelam a ocupação do cerrado aos planos de governo que visavam a “colonização” da região e também

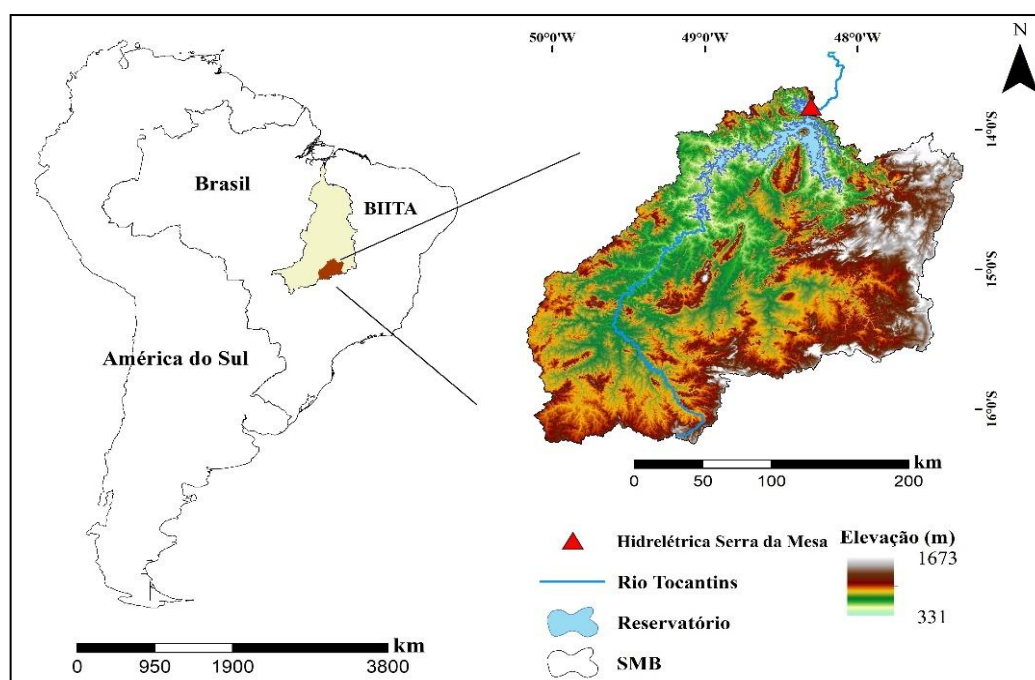
aos menores preços das terras em comparação com as da região Sudeste. Associado a isso, têm-se as inovações físico-químicas relacionadas ao manejo dos solos e as características topográficas do Cerrado que permitem a mecanização em grande escala. Desta forma, o Cerrado já teve mais de 50% de sua área original desmatada (COSTA; PIRES, 2010).

2.4.1 Serra da Mesa

Localizado na bacia hidrográfica do Tocantins-Araguaia (BHTA), a Usina hidrelétrica de Serra da Mesa (UHSM) (Figura 5) é a primeira na cascata de usinas instaladas no rio Tocantins. Na UHSM são gerados aproximadamente 1.275 MW, correspondendo a aproximadamente 10% da produção hidrelétrica da BHTA (ANEEL, 2018). O reservatório da UHSM tem área de 1.784 km², sendo o reservatório com maior volume de armazenamento no Brasil (THIENGO; SANTOS; FERNANDEZ, 2005).

A área de drenagem a montante da UHSM possui 51.238 km², aqui denominada de SMB. A elevação varia de 331 a 1.7673 m (Figura 5). O clima, de acordo com a classificação de Köppen, é tropical úmido e seco ou Savana tropical (Aw), caracterizado por inverno seco (ALVARES et al., 2013). Segundo as normais climatológicas (1981-2010), a precipitação média anual é 1.400 mm, com temperatura variando de 18 a 31°C e evapotranspiração potencial de 1.550 mm.

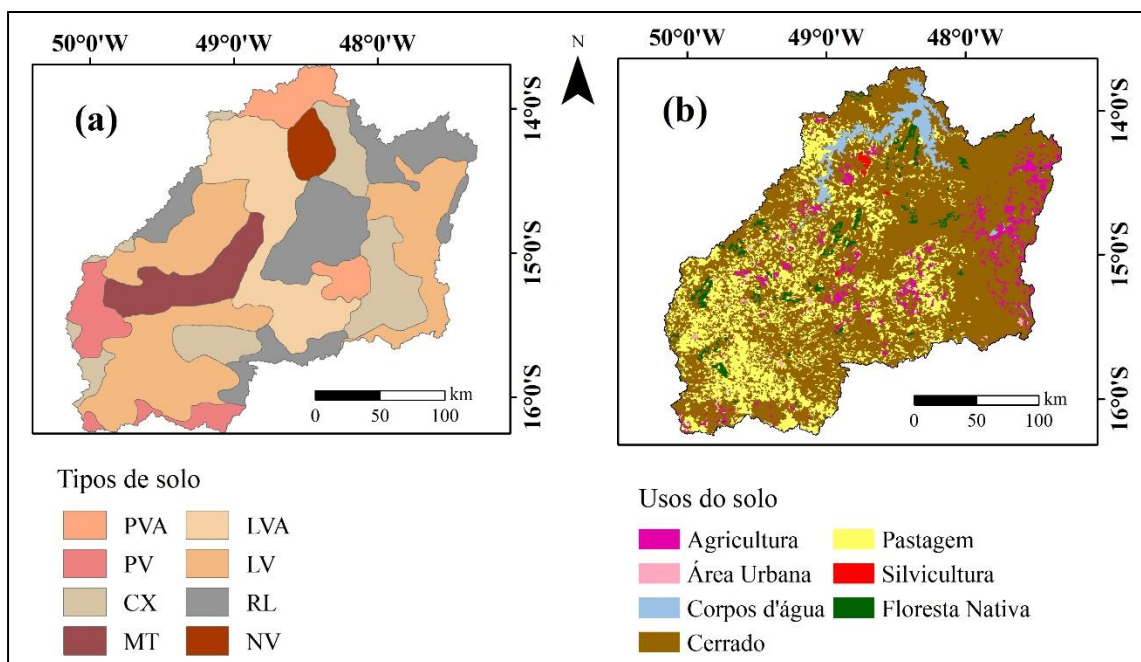
Figura 5 – Localização da bacia hidrográfica Tocantins-Araguaia (BHTA) na América do Sul (esquerda), e destaque para a área de drenagem abordada no presente estudo (direita).



Fonte: Do Autor (2021).

A partir das informações obtidas da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2011), a classe de solo predominante é o Latossolo Vermelho (LV — 31,02%), seguido de Neossolo Litólico (RL — 18,92%), Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA — 15,13%), Cambissolo Háplico (CX — 13,84%), Chernossolo Argilúvico (MT — 6,91%), Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA — 5,85%), Argissolo Vermelho (PV — 5,62%) e Nitossolo Vermelho (NV — 2,71%). A distribuição espacial dos solos pode ser visualizada na Figura 6a.

Figura 6 - Mapa de solo (a) e uso e ocupação do solo (b).



Fonte: Do Autor (2021).

Na Figura 6b está apresentado o mapa de uso e ocupação do solo obtido do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2015). A vegetação Cerrado é predominante e abrange uma área de 67,15%. Conforme Figura 6b, a parte mais preservada e com maior ocorrência de Cerrado está no nordeste da área de drenagem. As áreas de pastagem e agricultura são de 22,17% e 4,56%, respectivamente. Uma parcela significativa da área é ocupada por corpos d'água (3,37%). Isso é compreensível pela presença do reservatório de grandes magnitudes. Remanescentes florestais, em sua maioria Floresta Ombrófila, correspondem a 2,23%, enquanto as áreas urbanas e silvicultura ocupam 0,30% e 0,23%, respectivamente.

3 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A modelagem hidrológica é uma ferramenta importante para a gestão dos recursos hídricos. Entretanto, os modelos hidrológicos distribuídos são fortemente dependentes da qualidade dos dados de entrada, principalmente os dados de precipitação devido à alta variabilidade espacial e temporal.

Para suprir a ausência ou insuficiência das séries temporais de precipitação, uma vasta quantidade de base de dados produzida a partir de diferentes metodologias tem sido disponibilizada. Cada base de dados tem suas especificidades e podem agregar de maneiras diferentes na simulação da vazão em áreas de relevância hidrológica, ecossistêmica e socioeconômica. Enquanto os dados provenientes de satélites disponibilizam informações em escala global, alta resolução espacial e temporal da precipitação, as reanálises permitem séries temporais de longa duração. Por sua vez, as bases de dados interpolados são derivadas de observações em superfície e podem permitir a superar as limitações impostas por uma rede de monitoramento esparsa.

Desta forma, a investigação da aplicabilidade dessas bases de dados na simulação hidrológica no bioma Cerrado é importante para a mitigação de impactos na geração de energia elétrica, abastecimento público, irrigação e serviços ecossistêmico. Além de possibilitar a análise de cenários atuais, a aplicabilidade dos modelos hidrológicos devidamente calibrados com essas bases de dados podem auxiliar na identificação de eventos extremos, como secas e cheias, e impactos das mudanças climáticas no comportamento hidrológico em bacias hidrográficas estratégicas como a do Tocantins-Araguaia.

REFERÊNCIAS

- ABBASPOUR, Karim C. **SWAT-CUP: SWAT calibration and uncertainty programs: a user manual**, Eawag: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Duebendorf, Switzerland. 2015.
- ABBASPOUR, Karim C.; JOHNSON, C. A.; VAN GENUCHTEN, M. Th. Estimating Uncertain Flow and Transport Parameters Using a Sequential Uncertainty Fitting Procedure. **Vadose Zone Journal**, v. 3, n. 4, p. 1340–1352, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/vzj2004.1340>
- ABBASPOUR, Karim C.; VAGHEFI, Saeid; SRINIVASAN, Raghavan. A Guideline for Successful Calibration and Uncertainty Analysis for Soil and Water Assessment: A Review of Papers from the 2016 International SWAT Conference. **Water**, v. 10, n. 1, p. 6, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w10010006>
- ALFARO, Paulina; LIESCH, Tanja; GOLDSCHIEDER, Nico. Modelling groundwater over-extraction in the southern Jordan Valley with scarce data. **Hydrogeology Journal**, v. 25, n. 5, p. 1319–1340, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10040-017-1535-y>
- ALFIERI, Lorenzo *et al.* A global streamflow reanalysis for 1980–2018. **Journal of Hydrology X**, v. 6, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.hydroa.2019.100049>
- ALVARES, Clayton Alcarde *et al.* Köppen’s climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.
- ALVES, Elis Dener Lima; VECCHIA, Francisco Arthur Silva. Análise de diferentes métodos de interpolação para a precipitação pluvial no Estado de Goiás. **Acta Scientiarum. Human and Social Sciences**, v. 33, n. 2, p. 193-197, 2011.
- ANA – Agência Nacional de Águas (Brasil). **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil: regiões hidrográficas brasileiras – Edição Especial**. 2015. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/regioeshidrograficas2014.pdf>
- ANEEL – Agência Nacional De Energia Elétrica Aneel (Brasil). **Sistema de Informações de Geração da ANEEL SIGA**. 2018. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNjc4OGYyYjQ0YWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2IiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSI0ImMiOjR9>
- ARNOLD, Jeffrey G. *et al.* 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. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>
- ARNOLD, Jeffrey G. *et al.* SWAT: Model Use, Calibration, and Validation. **Transactions of the ASABE**, v. 55, n. 4, p. 1491–1508, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.13031/2013.42256>

- ASADI ZARCH, Mohammad Amin; SIVAKUMAR, Bellie; SHARMA, Ashish. Droughts in a warming climate: A global assessment of Standardized precipitation index (SPI) and Reconnaissance drought index (RDI). **Journal of Hydrology**, v. 526, p. 183–195, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.09.071>
- BEVEN, Keith. A manifesto for the equifinality thesis. **Journal of Hydrology**, v. 320, n. 1–2, p. 18–36, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.07.007>
- BLAINSKI, Éverton; ACOSTA, Eileen; NOGUEIRA, Patrícia Carvalho do Prado. Calibração e validação do modelo SWAT para simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica do litoral norte catarinense. **Revista Ambiente & Água**, Taubaté, v. 12, n. 2, p. 226–237, 2017. Disponível em: <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.1951>
- BRESSIANI, Danielle de Almeida *et al.* 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. Disponível em: <https://doi.org/10.3965/j.ijabe.20150803.1765>
- BUENO, Eduardo De Oliveira *et al.* Desempenho do modelo swat para diferentes critérios de geração de unidades de resposta hidrológica. **Scientia Agraria**, v. 18, n. 2, p. 114–125, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.5380/rsa.v18i2.50371>
- CABRAL, Samuellson Lopes *et al.* O Intervalo de Tempo para uma Máxima Previsibilidade da Precipitação sobre o Semiárido Brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 2, p. 105–113, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0102-778631220130034>
- CABRAL, Samuellson Lopes; SAKURAGI, Jójhy; SILVEIRA, Cleiton da Silva. Incertezas e erros na estimativa de vazões usando modelagem hidrológica e precipitação por RADAR. **Rev. Ambient. Água**, v. 12, n. 1, p. 57–70, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.4136/1980-993X>
- CALDEIRA, Tamara Leitzke *et al.* Modelagem hidrológica determinística chuva-vazão em bacias hidrográficas: uma abordagem INTRODUTÓRIA. **Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade**, v. 5, n. 1, p. 22, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.15210/rbes.v5i1.13231>
- CÂMARA, Renata Kelen Cardoso *et al.* Modelagem Hidrológica Estocástica Aplicada ao Rio Tocantins para a Cidade de Marabá-PA. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 1, p. 11–23, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0102-778620140092>
- CHANG, Alfred TC; CHIU, Long S. Nonsystematic errors of monthly oceanic rainfall derived from SSM/I. **Monthly weather review**, v. 127, n. 7, p. 1630–1638, 1999.
- COLLISCHONN, Bruno; COLLISCHONN, Walter; TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. Daily hydrological modeling in the Amazon basin using TRMM rainfall estimates. **Journal of Hydrology**, v. 360, n. 1–4, p. 207–216, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.07.032>
- COLLISCHONN, Walter *et al.* The MGB-IPH model for large-scale rainfall-runoff modelling. **Hydrological Sciences Journal**, v. 52, n. 5, p. 878–895, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1623/hysj.52.5.878>

- CORREA, Sly Wongchuig *et al.* Hydrological reanalysis across the 20th century: A case study of the Amazon Basin. **Journal of Hydrology**, v. 570, n. November 2018, p. 755–773, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.01.025>
- CORREA, Sly Wongchuig *et al.* Multi-decadal Hydrological Retrospective: Case study of Amazon floods and droughts. **Journal of Hydrology**, v. 549, p. 667–684, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.04.019>
- COSTA, Marcos Heil; PIRES, Gabrielle Ferreira. Effects of Amazon and Central Brazil deforestation scenarios on the duration of the dry season in the arc of deforestation. **International Journal of Climatology**, v. 30, n. 13, p. 1970–1979, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/joc.2048>
- DEE, D. P. *et al.* Toward a consistent reanalysis of the climate system. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 95, n. 8, p. 1235–1248, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00043.1>
- DEVIA, Gayathri K.; GANASRI, B.P.; DWARAKISH, G.S. A Review on Hydrological Models. **Aquatic Procedia**, v. 4, n. December, p. 1001–1007, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.126>
- DINKU, T. *et al.* Validation of high-resolution satellite rainfall products over complex terrain. **International Journal of Remote Sensing**, v. 29, n. 14, p. 4097–4110, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01431160701772526>
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Brasil). **Mapa de solos do Brasil**. 2011. Disponível em: <http://mapoteca.cnps.embrapa.br/projetos.aspx>. Acesso em: 14 dez. 2019.
- FALCK, Aline S. *et al.* Propagation of satellite precipitation uncertainties through a distributed hydrologic model: A case study in the Tocantins–Araguaia basin in Brazil. **Journal of Hydrology**, v. 527, p. 943–957, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.05.042>
- FUJIWARA, Masatomo *et al.* Introduction to the SPARC Reanalysis Intercomparison Project (S-RIP) and overview of the reanalysis systems. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 17, n. 2, p. 1417–1452, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/acp-17-1417-2017>
- GASSMAN, P. W. *et al.* The Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, Applications, and Future Research Directions. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 4, p. 1211–1250, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.13031/2013.23637>
- GREEN, W Heber; AMPT, G A. Studies on Soil Physics. **The Journal of Agricultural Science**, v. 4, n. 1, p. 1–24, 1911. Disponível em: <https://doi.org/DOI:10.1017/S0021859600001441>
- GU, Huang-he *et al.* Hydrological assessment of TRMM rainfall data over Yangtze River Basin. **Water Science and Engineering**, v. 3, n. 4, p. 418–430, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.3882/j.issn.1674-2370.2010.04.005>
- HAJIHOSSEINI, Hamidreza *et al.* Hydrological Assessment of the 1973 Treaty on the Transboundary Helmand River, Using the SWAT Model and a Global Climate Database.

Water Resources Management, v. 30, n. 13, p. 4681–4694, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11269-016-1447-y>

HARGREAVES, George H. Moisture Availability and Crop Production. **Transactions of the ASAE**, v. 18, n. 5, p. 0980–0984, 1975. Disponível em: <https://doi.org/10.13031/2013.36722>

HER, Younggu; CHAUBEY, Indrajeet. Impact of the numbers of observations and calibration parameters on equifinality, model performance, and output and parameter uncertainty. **Hydrological Processes**, v. 29, n. 19, p. 4220–4237, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/hyp.10487>

HERSBACH, Hans *et al.* ERA-20CM: A twentieth-century atmospheric model ensemble. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 141, n. 691, p. 2350–2375, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/qj.2528>

HORTON, Robert E. The Rôle of infiltration in the hydrologic cycle. **Eos, Transactions American Geophysical Union**, v. 14, n. 1, p. 446–460, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/TR014i001p00446>

HOU, Arthur Y. *et al.* The Global Precipitation Measurement Mission. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 95, n. 5, p. 701–722, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00164.1>

HOUZE JUNIOR, Robert A. **Cloud dynamics**. [S. l.]: Academic press, 1994.

HU, QingFang *et al.* Accuracy and spatio-temporal variation of high resolution satellite rainfall estimate over the Ganjiang River Basin. **Science China Technological Sciences**, v. 56, n. 4, p. 853–865, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11431-013-5176-7>

HUFFMAN, George J. *et al.* NASA global precipitation measurement (GPM) integrated multi-satellite retrievals for GPM (IMERG). **Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) Version**, v. 4, p. 26, 2015.

HUFFMAN, George J. *et al.* Global Precipitation Estimates Based on a Technique for Combining Satellite-Based Estimates, Rain Gauge Analysis, and NWP Model Precipitation Information. **Journal of Climate**, v. 8, n. 5, p. 1284–1295, 1995. Disponível em: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1995\)008<1284:GPEBOA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1995)008<1284:GPEBOA>2.0.CO;2)

HUFFMAN, George J. *et al.* Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG) Technical Documentation. **Journal of ISMAC**, v. 01, n. 02, 2019b. Disponível em: <https://doi.org/10.36548/jismac.2019.2>

HUFFMAN, George J. *et al.* The TRMM Multi-Satellite Precipitation Analysis (TMPA). *In: Satellite rainfall applications for surface hydrology*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2010. p. 3–22. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-90-481-2915-7_1

HUFFMAN, George J. *et al.* The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-Global, Multiyear, Combined-Sensor Precipitation Estimates at Fine Scales. **Journal of Hydrometeorology**, v. 8, n. 1, p. 38–55, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1175/JHM560.1>

IBGE – Instituto Brasileiro De Geografia E Estatística (Brasil). **Censo Demográfico 2010**.

2010.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia E Estatística – **Mudanças na cobertura e uso da terra 2000 - 2010 -2012.** 2015. Disponível em: <http://maps.lapig.iesa.ufg.br/?layers=pa_br_uso_solo_500_ibge>.

Intergovernmental Panel On Climate Change – IPCC. Climate Change 2013 - The Physical Science Basis. In: Intergovernmental Panel On Climate Change (Org.). **Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** Cambridge: Cambridge University, 2014. 33 p. ISBN: 9781107415324, ISSN: 1476-4687, DOI: 10.1017/CBO9781107415324

JIANG, Shan Hu *et al.* Evaluation of high-resolution satellite precipitation products with surface rain gauge observations from Laohahe Basin in northern China. **Water Science and Engineering**, v. 3, n. 4, p. 405–417, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.3882/j.issn.1674-2370.2010.04.004>

JIMÉNEZ, Karena Quiroz. **Previsão de vazão usando estimativas de precipitação por satélite e assimilação de dados.** 180 p. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de pesquisas hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2017.

JIMÉNEZ, Karena Quiroz; COLLISCHONN, Walter; DE PAIVA, Rodrigo Cauduro Dias. Data assimilation using the ensemble kalman filter in a distributed hydrological model on the tocantins river, Brasil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 24, p. 1–15, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2318-0331.241920180031>

KAUFFELDT, A. *et al.* Disinformative data in large-scale hydrological modelling. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 17, n. 7, p. 2845–2857, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/hess-17-2845-2013>

KIDD, Chris *et al.* Satellite Rainfall Estimation Using Combined Passive Microwave and Infrared Algorithms. **Journal of Hydrometeorology**, v. 4, n. 6, p. 1088–1104, 2003. Disponível em: [https://doi.org/10.1175/1525-7541\(2003\)004<1088:SREUCP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1525-7541(2003)004<1088:SREUCP>2.0.CO;2)

KIDD, Chris; LEVIZZANI, V. Status of satellite precipitation retrievals. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 15, n. 4, p. 1109–1116, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/hess-15-1109-2011>

KOBAYASHI, Shinya *et al.* The JRA-55 reanalysis: General specifications and basic characteristics. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, v. 93, n. 1, p. 5–48, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.2151/jmsj.2015-001>

KUMMEROW, Christian D. *et al.* The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Sensor Package. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 15, n. 3, p. 809–817, 1998. Disponível em: [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(1998\)015<0809:TTRMMT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1998)015<0809:TTRMMT>2.0.CO;2)

LIU, Y. *et al.* Advancing data assimilation in operational hydrologic forecasting: Progresses, challenges, and emerging opportunities. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 16, n. 10, p. 3863–3887, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/hess-16-3863-2012>

LOUREIRO, Glauber Epifanio; FERNANDES, Lindemberg Lima. variação da precipitação por método de interpolação geoestatística. **Revista Ambiente & Água**, v. 8, n. 2, p. 77–87, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.4136/1980-993X>

MACHADO, Aline R.; WENDLAND, Edson; KRAUSE, Peter. Hydrologic Simulation for Water Balance Improvement in an Outcrop Area of the Guarani Aquifer System. **Environmental Processes**, v. 3, n. 1, p. 19–38, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40710-016-0128-4>

MELLO, Carlos R *et al.* Climate Change Impacts on Water Resources of the Largest Hydropower Plant Reservoir in Southeast Brazil. **Water**, v. 13, n. 11, p. 1560, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w13111560>

MELLO, Carlos Rogério de; SILVA, Antonio M. da. **Hidrologia: princípios e aplicações em sistemas agrícolas**. Lavras: UFLA, 2013.

MISHRA, Anoop Kumar *et al.* Improved rainfall estimation over the Indian region using satellite infrared technique. **Advances in Space Research**, v. 48, n. 1, p. 49–55, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2011.02.016>

MMA – Ministério do Meio Ambiente. **Caderno da Região Hidrográfica do Tocantins Araguaia**. 2006. Disponível em: http://www.mma.gov.br/estruturas/161/_publicacao/161_publicacao02032011035943.pdf. Acesso em: 07 fev. 2018.

MONTE, Benício Emanuel Omena *et al.* Modelagem hidrológica e hidráulica aplicada ao mapeamento de áreas inundáveis. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH)**, v. 21, n. 1, p. 152–167, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.21168/rbrh.v21n1.p152-167>

MONTEIRO, José A. F. *et al.* Accuracy of grid precipitation data for Brazil: application in river discharge modelling of the Tocantins catchment. **Hydrological Processes**, v. 30, n. 9, p. 1419–1430, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/hyp.10708>

MONTEITH, J. L. Evaporation and environment. **Symposia of the Society for Experimental Biology**, n. 19, p. 205–234, 1965.

MUNCHAK, Stephen J. Remote sensing of precipitation from airborne and spaceborne radar. In: **Remote Sensing of Aerosols, Clouds, and Precipitation**. Elsevier, 2018. p. 267-299.

MYERS, Norman *et al.* Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, v. 403, n. 6772, p. 853, 2000. Disponível em: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/21564574.1998.9650003>

NEITSCH, S. L. et al. Soil & water assessment tool theoretical documentation, version 2009, Grassland, soil and water research laboratory-agricultural research service. **Blackland Research Center-Texas AgriLife Research**, 2011.

NEZLIN, Nikolay P.; STEIN, Eric D. Spatial and temporal patterns of remotely-sensed and field-measured rainfall in southern California. **Remote Sensing of Environment**, v. 96, n. 2, p. 228–245, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.02.005>

OLIVEIRA, Vinícius Augusto *et al.* Modeling the effects of climate change on hydrology and

sediment load in a headwater basin in the Brazilian Cerrado biome. **Ecological Engineering**, v. 133, n. April, p. 20–31, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.04.021>

ORIANI, Fabio et al. Missing data imputation for multisite rainfall networks: a comparison between geostatistical interpolation and pattern-based estimation on different terrain types. **Journal of Hydrometeorology**, v. 21, n. 10, p. 2325–2341, 2020.

PENMAN, H. L. Evaporation: An Introductory Survey. **Neth. J. Agric. Sci.**, v. 4, p. 9–29, 1956.

PEREIRA, I. S. *et al.* Brazilian cerrado agricultural border dynamics: policy and environmental implications. **Scientific Electronic Archives**, v. 13, n. 2, p. 36, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.36560/13120201005>

PHILIP, J R. The theory of infiltration: Sorptivity and algebraic infiltration equations. **Soil Science**, v. 84, n. 3, 1957. Disponível em: https://journals.lww.com/soilsci/Fulltext/1957/09000/THE_THEORY_OF_INFILTRATION_4__SORPTIVITY_AND.10.aspx

PRAKASH, Satya *et al.* A preliminary assessment of GPM-based multi-satellite precipitation estimates over a monsoon dominated region. **Journal of Hydrology**, v. 556, n. February 2014, p. 865–876, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.01.029>

PRIESTLEY, C. H. B.; TAYLOR, R. J. On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-Scale Parameters. **Monthly Weather Review**, v. 100, n. 2, p. 81–92, 1972. Disponível em: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1972\)100<0081:otaosh>2.3.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1972)100<0081:otaosh>2.3.co;2)

PRIGENT, Catherine. Precipitation retrieval from space: An overview. **Comptes Rendus Geoscience**, v. 342, n. 4–5, p. 380–389, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.crte.2010.01.004>

REICHLE, Rolf H. *et al.* Assessment of MERRA-2 land surface hydrology estimates. **Journal of Climate**, v. 30, n. 8, p. 2937–2960, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0720.1>

RIGHETTO, Antônio Marozzi *et al.* Hydrological modeling of a detention reservoir: flood control and aquifer recharge. **Rbrh**, v. 21, n. 4, p. 752–765, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2318-0331.011616041>

RODRIGUES, Jéssica Assaid Martins *et al.* Climate change impacts under representative concentration pathway scenarios on streamflow and droughts of basins in the Brazilian Cerrado biome. **International Journal of Climatology**, n. January, p. 1–16, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/joc.6347>

ROUHOLAHNEJAD, Elham *et al.* Water resources of the Black Sea Basin at high spatial and temporal resolution. **Water Resources Research**, v. 50, n. 7, p. 5866–5885, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/2013WR014132>

SAHA, Suranjana *et al.* The NCEP climate forecast system reanalysis. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 91, n. 8, p. 1015–1057, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1175/2010BAMS3001.1>

SALIO, Paola *et al.* Evaluation of high-resolution satellite precipitation estimates over southern South America using a dense rain gauge network. **Atmospheric Research**, v. 163, p. 146–161, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.11.017>

SCHUOL, J.; ABBASPOUR, Karim C. Using monthly weather statistics to generate daily data in a SWAT model application to West Africa. **Ecological Modelling**, v. 201, n. 3–4, p. 301–311, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2006.09.028>

SHI, Haiyun; LI, Tiejian; WEI, Jiahua. Evaluation of the gridded CRU TS precipitation dataset with the point raingauge records over the Three-River Headwaters Region. **Journal of Hydrology**, v. 548, p. 322–332, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.03.017>

SILVA, Kennedy Ribeiro da *et al.* Interpolação espacial da precipitação no Estado do Espírito Santo. **Floresta e Ambiente**, v. 18, n. 4, p. 417–427, 2012.

SIDIKE, Ayetiguli *et al.* Investigating Alternative Climate Data Sources for Hydrological Simulations in the Upstream of the Amu Darya River. **Water**, v. 8, n. 10, p. 441, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w8100441>

SILVA, Claiton Márcio da. A grande aceleração e a fronteira agrícola no Cerrado. **Varia Historia**, v. 34, n. 65, p. 409–444, 2018.

SILVA, Richarde Marques da *et al.* 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. Disponível em: <https://doi.org/10.2166/nh.2018.222>

TAO, W.-K. *et al.* TRMM Latent Heating Retrieval: Applications and Comparisons with Field Campaigns and Large-Scale Analyses. **Meteorological Monographs**, v. 56, n. Code 612, p. 2.1-2.34, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1175/AMSMONOGRAPHS-D-15-0013.1>

TAPIADOR, Francisco J. *et al.* Global precipitation measurement: Methods, datasets and applications. **Atmospheric Research**, v. 104–105, p. 70–97, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2011.10.021>

TAPIADOR, Francisco J. Measuring precipitation from space. In: **Remote sensing of aerosols, clouds, and precipitation**. Elsevier, 2018. p. 211–221.

THIENGO, Silvana C.; SANTOS, Sonia B.; FERNANDEZ, Monica A. Malacofauna límnic da área de influência do lago da usina hidrelétrica de Serra da Mesa, Goiás, Brasil.: I. Estudo qualitativo. **Revista Brasileira de Zoologia**, v. 22, n. 4, p. 867–874, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0101-81752005000400010>

TITCHNER, Holly A.; RAYNER, Nick A. The Met Office Hadley Centre sea ice and sea surface temperature data set, version 2: 1. Sea ice concentrations. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 119, n. 6, p. 2864–2889, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/2013JD020316>

TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. **Modelos Hidrológicos**. 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005.

USDA, SCS. United States Department of Agriculture, Soil Conservation Service. **National Engineering Handbook**. Hydrology Section, v. 4, p. 4-10, 1972.

VARMA, Atul K. Measurement of Precipitation from Satellite Radiometers (Visible, Infrared, and Microwave): Physical Basis, Methods, and Limitations. *In: REMOTE SENSING OF AEROSOLS, CLOUDS, AND PRECIPITATION*. [S. l.]: Elsevier Inc., 2018. p. 223–248. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-810437-8.00011-6>

VIOLA, Marcelo Ribeiro *et al.* Assessing climate change impacts on Upper Grande River Basin hydrology, Southeast Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 35, n. 6, p. 1054–1068, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/joc.4038>

VIOLA, Marcelo Ribeiro *et al.* Impacts of Land-use Changes on the Hydrology of the Grande River Basin Headwaters, Southeastern Brazil. **Water Resources Management**, v. 28, n. 13, p. 4537–4550, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0749-1>

WHITTAKER, Gerald *et al.* Detection of Overparameterization and Overfitting in an Automatic Calibration of SWAT. **Transactions of the ASABE**, v. 53, n. 5, p. 1487–1499, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.13031/2013.34909>

WORQLUL, Abeyou W. *et al.* Evaluation of CFSR, TMPA 3B42 and ground-based rainfall data as input for hydrological models, in data-scarce regions: The upper Blue Nile Basin, Ethiopia. **Catena**, v. 152, p. 242–251, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.01.019>

XAVIER, Alexandre C.; KING, Carey W.; SCANLON, Bridget R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013). **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 6, p. 2644–2659, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/joc.4518>

YANG, Jing; REICHERT, Peter; ABBASPOUR, Karim C. Bayesian uncertainty analysis in distributed hydrologic modeling: A case study in the Thur River basin (Switzerland). **Water Resources Research**, v. 43, n. 10, p. 1–13, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2006WR005497>

ZHANG, Ling *et al.* Interpolated or satellite-based precipitation? Implications for hydrological modeling in a meso-scale mountainous watershed on the Qinghai-Tibet Plateau. **Journal of Hydrology**, v. 583, n. January, p. 124629, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124629>

SEGUNDA PARTE

ARTIGOS

**ARTIGO 1 – EVALUATION OF SATELLITE PRECIPITATION PRODUCTS
FOR HYDROLOGICAL MODELING IN THE BRAZILIAN CERRADO BIOME**

Jhones da S. Amorim^{1*}, Marcelo R. Viola¹, Rubens Junqueira¹, Vinicius A. de Oliveira¹, and
Carlos R. de Mello¹

¹ Federal University of Lavras, Department of Water Resources, Lavras, Minas Gerais, Brazil;
e-mail: jhonesamorim@gmail.com; marcelo.viola@ufla.br, rubensjunqueira@live.com,
aovinicius@gmail.com, and crmello@ufla.br.

Artigo apresentado na íntegra, conforme foi publicado, nas normas do periódico científico
“*Water*” ISSN: 2073-4441

Abstract: This study investigates the applicability of Satellite Precipitation Products (SPPs) in streamflow simulations performed in the Brazilian Cerrado biome, which is one of the world's biodiversity hotspots. Local data from ground observations were used as a reference for evaluating the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA) and Integrated Multi-Satellite Retrievals for Global Precipitation Measurement (IMERG). The Soil and Water Assessment Tool (SWAT) was used to simulate the streamflow in a subbasin of the Tocantins River basin. Statistical precision metrics showed that both SPPs presented a satisfactory performance for precipitation monitoring on a monthly scale, in which IMERG performed better than TMPA. The Nash–Sutcliff coefficient and Kling–Gupta efficiency obtained for both calibration and validation period were greater than 0.82 and 0.79, respectively, demonstrating that both SPPs were able to simulate the hydrological regime adequately. However, the bias indicated that the SPPs overestimated the observed streamflow. The r-factor and p-factor values showed that both TMPA and IMERG presented low uncertainty in streamflow simulations. SPPs offer a great alternative for monitoring the precipitation and hydrological studies in the Brazilian Cerrado biome, and presented better simulation results than rain gauges.

Keywords: GPM IMERG, TRMM-TMPA, Soil and Water Assessment Tool, Brazilian Savanna

1. Introduction

Precipitation is one of the main components of the hydrological cycle due to the significant role that it plays in various socio-economic activities. It involves complex physical processes and displays high spatial and temporal variability [1–3]. Accurate estimates of precipitation are crucial for a wide range of climate and hydrology applications [4]. Despite its importance, in several locations around the world, the monitoring network of precipitation has limitations related to density, frequency of observations, and infrastructure [2].

The rain gauges provide data for calibration and validation for other precipitation data sources [5]. They are considered the reference data source for precipitation [3] and the most adequate data for hydrological modeling. However, rain gauge measurements have limitations, such as spatial coverage and point measurement, mainly in tropical developing regions, where high variability makes precipitation one of the most difficult weather variables for estimating [1]. Furthermore, only a few countries can afford a dense rainfall monitoring network [6]. Currently, Brazil has an average density of one rain gauge per 720 km² [7], which is below that recommended by the World Meteorological Organization. Moreover, precipitation regimes of large areas in Brazil are not recorded due to the uneven spatial distribution of rain gauges [6].

Despite providing data with a high spatial and temporal resolution, ground-based radar systems are not feasible in developing countries due to the high cost and maintenance required [8]. To overcome these limitations, Satellite Precipitation Products (SPPs) are a promising alternative to improve spatial precipitation measurements [9,10]. In recent decades, SPPs have been available with nearly global coverage and high space-time resolution [3,10], such as the Tropical Rainfall Measuring Mission Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA) [11] and Integrated Multi-satellite Retrievals for Global Precipitation Measurement (IMERG) [12].

TMPA was the first dedicated meteorological precipitation satellite to be used worldwide [1,8,9,13–17]. However, Gadelha et al. [7] have highlighted a need to assess the accuracy of TMPA in comparison to ground-based data on a regional basis. After the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM), IMERG was launched to provide the next generation of multi-sensor precipitation data more accurately, since the Ka-band in the Dual-frequency Precipitation Radar (DPR) used by Global Precipitation Measurement (GPM) is more sensitive than the TRMM Precipitation Radar (PR) in light rainfall [4]. Studies assessing the performance of IMERG for precipitation estimation have been carried out in different regions of the world [18–20]. A recent study to evaluate the applicability of IMERG in Brazil

was performed by Gadelha et al. [7]. Nevertheless, they did not use IMERG version 6 (launched in June 2019), which introduces significant improvements over to the previous version [12].

Since the accuracy of SPPs varies with the characteristics of the region and season of the year [17,21–23], and streamflow simulations are profoundly affected by the uncertainties associated with precipitation datasets [1], recent studies have used the propagation of the precipitation errors in hydrological simulations to evaluate the reliability of SPPs [6,8,10,18,24].

Bitew and Gebremichael [25] stated that the use of the SPPs as inputs in hydrological models has two main advantages. The first is the reduction of the spatial variability that arises using rain gauges directly to validate the SPPs, since the models are performed at a basin scale. The second is the validation of the SPPs for a specific application, which is typical in water resource planning, instead of just precipitation monitoring. In addition, SPPs can overcome the limitations that arise from the low densities of rain gauge networks and provide a better representation of the spatial variability of precipitation, therefore improving the hydrologic model performances [8,26].

The Brazilian Cerrado biome covers approximately two million square kilometers of the central area of the country [27] and is the second-largest biome in South America. Also referred to as the Brazilian Savanna, the Cerrado is one of the richest and most endemic biomes of the world [28] and has suffered severe anthropogenic impacts such as agricultural expansion and livestock activities [29]. For this reason, the Cerrado is considered one of the environmental hotspots of the world [30].

The Cerrado biome plays an essential role in the water supply and social-economic development of Brazil since it is present in the headwaters of major basins in Brazil and South America such as the Paraná, Paraguai, Tocantins, and São Francisco [31]. Furthermore, a significant portion of the Guarani aquifer, one of the largest aquifer systems of the world and the largest reservoir of groundwater in South America, is located in the Cerrado [31,32]. Nobrega et al. [29] stated that the water balance components in the Cerrado are poorly understood and their hydrological characterization is often limited. Thus, understanding the hydrological dynamics in the Cerrado biome is crucial for water management in Brazil and South America.

Given that SPPs are a possible alternative for hydrological modeling, and the importance of the Brazilian Cerrado biome to biodiversity and water supply, the objectives of this study were to: (i) assess the reliability of TMPA and IMERG precipitation products concerning conventional ground-based measurements (rain gauges) in a basin located in the Cerrado biome; (ii) calibrate and validate the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model using rain gauges and the SPPs in a basin of the Cerrado biome, assessing and comparing the model performances for streamflow simulation.

2. Materials and Methods

2.1. Study Area

The Tocantins-Araguaia river basin (TARB) is the largest basin entirely inserted in the Brazilian territory [6] (Figure 1), accounting for 9% of the country's area [1]. It has a drainage area of the 764,000 km². Furthermore, approximately 64% of the runoff comes from regions where the Cerrado biome is predominant [33]. The TARB is essential for water supply, irrigation, and hydroelectricity generation, being the third-ranked Brazilian basin in installed hydropower, with 13.14 GW comprising 15% of the installed capacity of the country [34]. However, the TARB has the lowest number of rain gauges among the Brazilian basins [35], which undermines the appropriate capture of the spatial distribution of the precipitation and can introduce unknown uncertainties into the estimated spatial precipitation due to the low density of the rain gauge network.

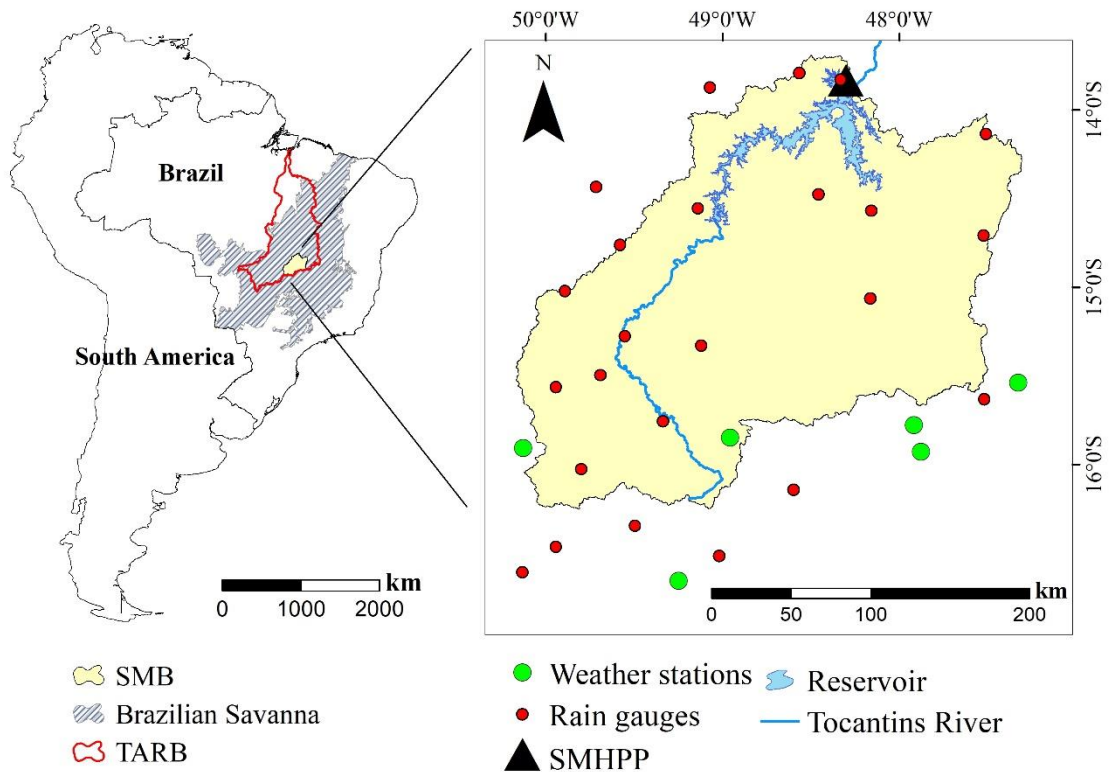


Figure 1. Tocantins-Araguaia River Basin (TARB), Serra da Mesa Basin (SMB), Serra da Mesa Hydropower Plant (SMHPP), weather stations, and rain gauges location.

The study area comprises the upstream drainage area of the Serra da Mesa Hydropower Plant (SMHPP) (Figure 1) in the TARB. The Serra da Mesa Basin (SMB) has a drainage area of 51,238 km² and is responsible for generating 1,275 MW, approximately 10% of the total hydroelectricity in the TARB [36]. The SMHPP reservoir has 1,784 km² of surface area and is the largest in Brazil in amount of dammed water [37].

According to Koppen's climate classification, the climate of the basin is predominantly Aw (tropical Savanna) with a dry winter [38]. During a long-term climate observed from 1981 to 2010, the average annual precipitation was 1,400 mm, the maximum and minimum average annual temperatures were 31 and 18 °C, respectively, and the average annual potential evapotranspiration was 1,550 mm. Regarding the topography, the elevation of the SMB ranges between 405 m and 1,673 m.

2.2. Precipitation Dataset

2.2.1. Ground-Based Precipitation

Daily precipitation data were obtained from the Brazilian National Institute of Meteorology (INMET) and the Brazilian National Water Agency (ANA—Hidroweb). Precipitation data from 30 rain gauges (Figure 1) were analyzed for consistency evaluation. The criteria adopted for the selection of rain gauges was that they should have less than 10% of missing data in the precipitation time series from June 2000 to December 2018 [6].

2.2.2. Satellite Precipitation Products (SPPs)

The SPP data were obtained from the NASA Goddard Space Flight Center (<https://gpm.nasa.gov>), from which the Tropical Rainfall Measurement Mission (TRMM) and the Global Precipitation Measurement (GPM) products were used (Figure 2). The TRMM is a low-Earth orbit satellite resulting

from a joint project between the Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) and the National Aeronautics and Space Administration (NASA) launched in late 1997. The TRMM orbits at an angle of 35° to Ecuador and provides precipitation products between the latitudes of 50° N and 50° S, with temporal resolution varying from three hours to one month and spatial resolutions from 0.25° to 5° [11]. TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA) is based on the calibration of the products from Infrared (IR), Microwave Passive (MP) wavelength measurements of various satellites, and bias correction of the remote sensing precipitation using rain gauges [11]. In this study, the 7th version of the TMPA (3B42V7) dataset, with a spatial resolution of $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ and daily temporal resolution, was used.

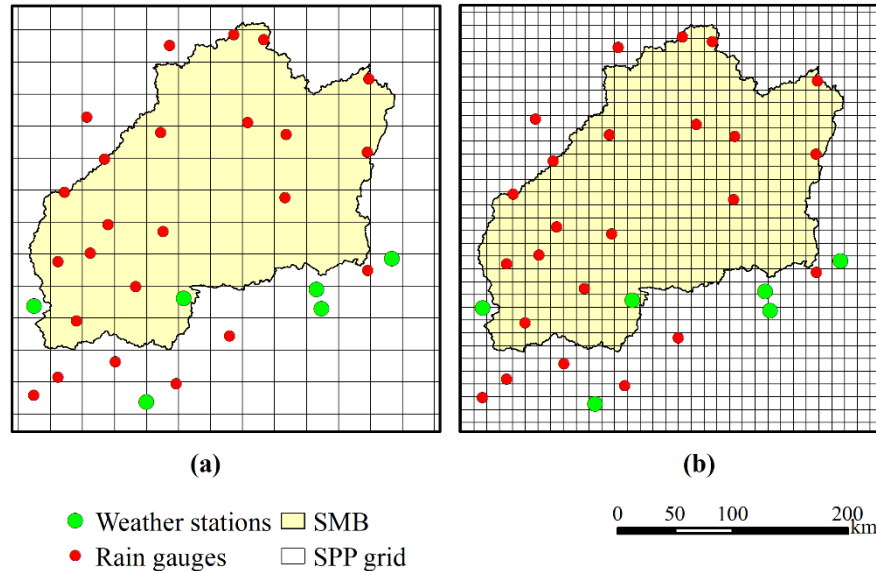


Figure 2. Spatial distribution of weather stations and rain gauges in relation to TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA) (a) and Integrated Multi-Satellite Retrievals for GPM (IMERG) (b).

The Global Precipitation Measurement (GPM) started with the launch of the GPM Core Observatory in early 2014. GPM is a satellite mission designed to provide a new generation of rainfall observations that are more accurate than the TRMM [10,39]. The GPM Core sensors extend the measurement range attained by the TRMM and provide information globally [39]. Moreover, the Integrated Multi-Satellite Retrievals for GPM (IMERG) provide rainfall and snow information products at $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ (spatial) and half-hour (temporal) resolutions to global coverage. IMERG compensates for the low frequency of MP sensors onboard satellites in low-Earth orbits by combining as many satellites as possible with IR sensors in geocentric orbit [12]. The IMERG dataset used in this study was the IMERG Final Run Version 6 (IMERGF-V6) at a $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ (spatial) and daily (temporal) resolution.

2.3. Hydrological Model Description

In this study, the Soil and Water Assessment Tool (SWAT—<http://swat.tamu.edu>) in its 2012 version was used to simulate the streamflow of the SMB. The SWAT is a basin-scale, physically based, semi-distributed, long-term, and continuous-time hydrological model that operates on a daily time step. The SWAT was developed by the US Agricultural Research Service (ARS) to predict the impact on water, sediment production, and agricultural chemicals from land use and management practices [40,41].

The SWAT divides the watershed into multiple subbasins connected by the drainage network based on a Digital Elevation Model (DEM). Each subbasin is further divided into Hydrologic Response Units (HRU) that consist of lumped land comprising unique soil characteristics, land use, management, and topography [40,41].

The water balance, which is the driving force behind the SWAT simulation, is computed for each HRU and accumulated to obtain the total for the subbasins [42]. Equation (1) describes the water balance adopted by the swat model through which the main processes of the hydrological cycle, such as surface and subsurface flows, infiltration, percolation, plant uptake, evapotranspiration, and soil moisture, are obtained.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{\text{day},i} - Q_{\text{surf},i} - E_{a,i} - W_{\text{seep},i} - Q_{\text{gw},i}), \quad (1)$$

where SW_t is the final soil water content (mm H_2O), SW_0 is the initial soil water content on day i (mm); t is the time (days), $R_{\text{day},i}$ is the amount of precipitation on day i (mm), $Q_{\text{surf},i}$ is the amount of surface runoff on day i (mm), $E_{a,i}$ is the amount of evapotranspiration on day i (mm), $W_{\text{seep},i}$ is the amount of water entering the vadose zone from the soil profile on day i (mm), and $Q_{\text{gw},i}$ is the amount of return flow on day i (mm).

The Potential Evapotranspiration (PET) can be computed in the SWAT by the Priestley and Taylor [43], Hargreaves [44], or Penman–Monteith methods [45,46]. The surface runoff is modeled using either the Green–Ampt method [47] or a modification of the Soil Conservation Service (SCS) curve number method (CN-SCS) [48]. The peak flow is obtained by a modified rational method and the flow is routed through the channel using either a variable storage coefficient method or the Muskingum routing method. In this study, the Penman–Monteith, CN-SCS, and variable storage coefficient methods were applied. The SWAT theoretical documentation, Neitsch et al. [49], Arnold et al. [41], and Srinivasan et al. [50] provide the model equations and detailed description.

2.4. Model Setup

Streamflow simulation in the SWAT requires different types of input data such as the Digital Elevation Model (DEM), soil maps, land use maps, weather, and streamflow data. The river basin delineation, creation of streams, characteristics of the subbasins, and stream network were computed through an Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) DEM with a spatial resolution of 30 m downloaded from the USGS (United States Geological Survey) (Figure 3c).

The soil map (Figure 3a) with a 1:5,000,000 scale used in this study was derived from the Brazilian Agricultural Research Corporation [51]. The soil types in the SMB (Figure 2) are Red Latosol (LV) 31.02%; Litholic Neosol (RL) 18.92%; Red-Yellow Latosol (LVA) 15.13%; Haplic Cambisol (CX) 13.84%; Argiluvic Chernosol (MT) 6.91%; Red-Yellow Argisol (PVA) 5.85%; Red Argisol (PV) 5.62%; and Red Nitisol (NV) 2.71%. The land use map (Figure 3b) was provided by the Brazilian Institute of Geography and Statistics [52] at a 1:500,000 scale. The land use in the SMB (Figure 3b) is predominantly Cerrado (Brazilian Savanna), pasture, and agriculture, which represent 67.15%, 22.17%, and 4.56% of the area, respectively, followed by water bodies (3.37%) and forest (2.23%). Urbanization and silviculture account for less than 0.60% of the basin area.

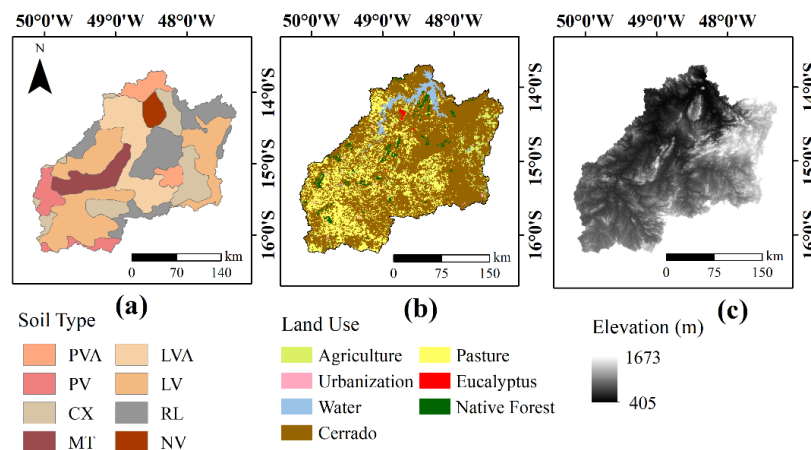


Figure 3. Spatial distribution of (a) soil types (b) and land cover, and (c) Digital Model Elevation (DEM) of the SMB.

Daily weather data from June 2000 to December 2018, such as maximum and minimum temperatures, humidity, wind speed, and solar radiation were taken from six weather stations in the Meteorological Database for Education and Research (BDMEP) of the Brazilian Weather Bureau (INMET) (Figure 1). In the SWAT model, all weather data were categorized into subbasins according to the “nearest-distance” principle [53]. Therefore, a SWAT subbasin will use the weather data from the weather station that is closest to its centroid. The weather data were used in the model simulations for computing the potential evapotranspiration through the Penman–Monteith method. The partition of the precipitation between infiltration and surface runoff was computed using the SCS curve number method and the variable storage coefficient method was used for routing in the channel.

The grids containing the SPP data (TMPA and IMERG) were delimited using the boundaries of the basin and transformed into points representing the centroid of each pixel. The historical series of daily precipitation obtained at each point of the SPPs were used as input in the SWAT. For the hydrological simulation, 460 and 79 points were used within the basin area from IMERG and TMPA, respectively. Similar to the weather data, both SPP and rain gauge data were categorized into subbasins according to the “nearest-distance” principle.

Due to the presence of the reservoir in the basin, the naturalized streamflow data from the SMHPP were obtained from the National Electric System Operator (ONS) and used for comparison between the SWAT model simulation results. Naturalized streamflows are those that occur if there is no reservoir in a basin [54], and they are derived from an integrated system that incorporates 96 stochastic models for forecasting the streamflows in each hydropower plant [55]. Naturalized streamflows have been used in several studies of hydrological modeling in Brazil, such as those by Cassalho et al. [13], Nóbrega et al. [56], and Oliveira et al. [55].

2.5. Calibration and Validation of the SWAT Model

The calibration, validation, and uncertainty analysis were carried out automatically using the program SWAT Calibration and Uncertainty Procedures (SWAT-CUP) [57]. Among different calibration algorithms in SWAT-CUP, the Sequential Uncertainty Fitting algorithm (SUFI-2) was used in this study with Nash–Sutcliffe efficiency (NSE) as an objective function.

The SUFI-2 algorithm [53,58] expresses all uncertainties, such as uncertainty in the conceptual model, drive variables, and measured data, within the parameter ranges, and attempts to capture most of the measured data within the 95% prediction uncertainty (95PPU) of the model in an iterative process [59]. The 95% prediction uncertainty is calculated at 2.5% and 97.5% levels of the cumulative distribution of an output variable obtained by sampling in a Latin hypercube. Both p-factor (percentage of observation within the 95PPU band) and r-factor (which corresponds to the average thickness of the 95PPU band divided by the standard deviation of the measured data) were used to evaluate the uncertainty of the simulation. Although there are no exact numbers for what these two factors should be, Abbaspour et al. [59] suggested a p-factor greater than 0.7 (>70%) and an r-factor around 1 for streamflow simulation.

The streamflow simulation was performed for the period from June 2000 to December 2018. In large basins, the water resources management and planning are carried out monthly, and the observed hydrological data, which are then more readily available, are used for calibrating and validating hydrological models [55]. The first two years were used as a warm-up period to reduce the uncertainties regarding the initial conditions of the surface domain [60]. The period from January 2002 to December 2010 was used for calibration. The initial ranges of the parameters used in calibration were selected based on previous studies conducted in the Cerrado biome, such as Oliveira et al. [27] and Rodrigues et al. [61]. Subsequently, the parameters were adjusted for the study area through two iterations with 500 simulations each through the SUFI-2 algorithm implemented in SWAT-CUP. The validation consisted of running the model from January 2011 to December 2018 using the parameters adjusted in the calibration period.

2.6. Meteorological and Hydrological Evaluation

The performance of the SPPs was divided into precipitation assessment (comparison with rain gauges) and hydrological assessment (comparing the validation of SWAT streamflow simulations and observed streamflow). As the pixel-to-pixel approach requires a high density of rain gauges [62], uncertainties may arise from the interpolation of data due to the low density of rain gauges [63]. Furthermore, the spatial resolutions of TMPA and IMERG are different, which can affect the comparison. For this reason, the point-to-pixel approach was used to compare the precipitation rain gauges against SPPs in this study [62–65]. In this approach, the rain gauges closest to the centroid of the SPP grid pixel were compared with SPPs on a daily and monthly basis. The performance of the SPPs was assessed through statistical metrics (Table 1), including the root mean square error (RMSE), percentage bias (Pbias), correlation coefficient (r), and Kling–Gupta efficiency (KGE) [66].

The hydrological assessment of the SPPs was carried out by comparing the SWAT streamflow simulation using the different precipitation inputs (rain gauges, TMPA, and IMERG). In addition to the uncertainty analysis performed using the p-factor and r-factor described in Section 2.5, the Pbias, NSE, and KGE (Table 1) were adopted to evaluate the model’s performance regarding the calibration and validation periods. The evaluation criteria considered in this study was proposed by Moriasi et al. [67]: “very good” ($NSE > 0.75$; $PBIAS < \pm 10$), “good” ($0.65 < NSE < 0.75$; $\pm 10 < PBIAS < \pm 15$), “satisfactory” ($0.50 < NSE < 0.65$; $\pm 15 < PBIAS < \pm 25$), and “unsatisfactory” ($NSE < 0.50$; $PBIAS > \pm 25$). In addition, the KGE closest to 1 indicates the best fit of the model [66].

Table 1. Statistical metrics for hydrological and meteorological assessment.

Statistical Metrics	Equation	Perfect Value	Unit
Root mean square error	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}}$	0	mm
Correlation coefficient	$r = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}}$	1	NA
Percentage bias	$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} \times 100$	0	%
Kling–Gupta efficiency	$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\beta - 1)^2 + (\gamma - 1)^2}$ $\beta = \frac{\bar{P}}{\bar{O}}$ $\gamma = \frac{\sigma_p/\bar{P}}{\sigma_o/\bar{O}}$	1	NA
Nash–Sutcliffe Efficiency	$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$	1	NA

\bar{P} and \bar{O} are the average of the estimated and observed variable, respectively; P_i and O_i are the i^{th} estimated and observed variable, respectively; n is the number of observations; and σ_p and σ_o are the standard deviation of the estimated and observed variable, respectively.

3. Results

3.1. Validation of SPP against Rain Gauges

Figure 4 shows the box plots of the statistical metrics as well as the points representing the result of the comparison between SPPs against rain gauge over the SMB on a daily and monthly basis. Overall, IMERG and TMPA presented similar results at both time scales. The average Pbias indicates that IMERG presented more overestimation than TMPA on a daily (Pbias of -3.13% and -0.34% , respectively) and monthly time scale (Pbias of -3.56% and -0.75% , respectively). The highest overestimations for IMERG and TMPA were 40.20% and 37.80% , respectively, at both time scales. On the other hand, the underestimation reached 28.7% and 33.3% for IMERG and TMPA, respectively.

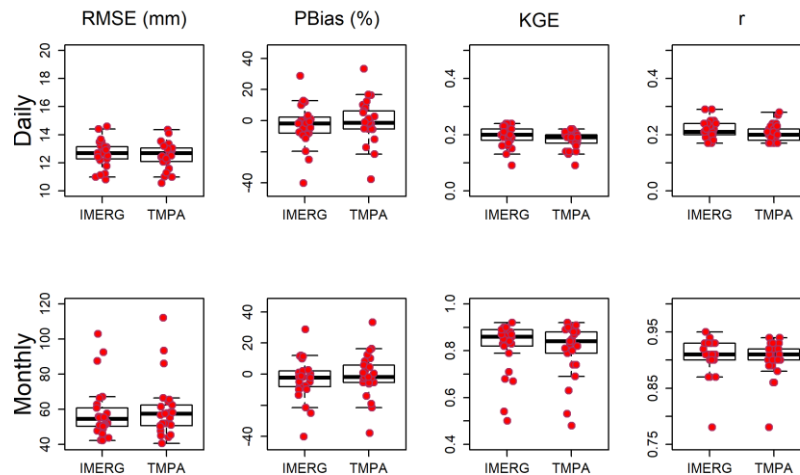


Figure 4. Boxplot of the statistical metrics on a daily and monthly time scale for all rain gauges over the SMB.

The magnitude of error between SPPs and rain gauges presented by the RMSE showed similar values, mainly daily time scale, in which the average RMSEs for IMERG and TMPA were 12.65 and 12.54 mm, respectively. However, a better performance for the average RMSE was obtained on a monthly time scale by IMERG (58.09 mm) in comparison to TMPA (59.61 mm). In addition, the coefficient of correlation (r) highlighted the greater performance of IMERG. Both TMPA and IMERG showed a lower correlation with gauges on a daily time scale. Despite varying at similar magnitudes, the monthly average r value of IMERG was greater than TMPA, being 0.91 and 0.90, respectively. As a result, the precipitation derived from IMERG presented a slightly better agreement with rain gauges than TMPA. For KGE, the results ranged from 0.09 to 0.24 for IMERG, and from 0.09 to 0.22 for TMPA, when the comparison was performed on a daily scale. Similar to the r values, average KGE values increased on a monthly scale, ranging from 0.50 to 0.92 for IMERG and from 0.48 to 0.92 for TMPA. The average KGE values of IMERG were slightly better than TMPA.

3.2. Monthly Streamflow Simulation Using SPP and Rain Gauges

Table 2 presents the parameters that were used in the SWAT model with their respective initial ranges, which were selected from the literature review of hydrological modeling studies in the Brazilian Cerrado biome [27,61], and the range of the parameters obtained by SUFI2. It is interesting to highlight that the simulations driven by IMERG and rain gauges resulted in similar parameter values. A detailed description of the parameters used in this study can be obtained in Neitsch et al. [49].

Table 2. Statistical metrics for hydrological and meteorological assessment.

Parameter	Initial Range	Rain Gauges		TMPA		IMERG	
		Final Range	Best Fit	Final Range	Best Fit	Final Range	Best Fit
esco.hru ¹	0.5–0.95	0.5–0.77	0.548	0.5–0.91	0.617	0.5–0.77	0.548
cn2.mgt ²	(-0.2)–0.2	(-0.2)–0.011	-0.06	(-0.2)–0.025	-0.13	(-0.2)–0.0114	-0.06
alpha_bf.gw ¹	0–0.01	0.0038–0.01	0.009	0.0047–0.01	0.0095	0.0038–0.01	0.009
gw_delay.gw ³	(-30)–60	(-8.454)–37.194	-2.02	(-26.814)–31.074	-24.44	(-8.454)–37.194	-2.02
gwqmn.gw ³	(-1000)–1000	(-83.202)–1000	916.6	(-377.201)–869.201	-301.2	(-83.202)–1000	916.6
canmx.hru ¹	0–50	16.2–48.83	45.411	18.8–50	33.104	16.2–48.83	45.411
ch_k2.rte ¹	(-0.01)–10	3.50–10	7.915	3.82–10	4.183	3.50–10	7.913
ch_n2.rte ¹	(-0.01)–0.3	0.086–0.278	0.195	0.0763–0.249	0.208	0.086–0.279	0.195
epco.bsn ¹	0.01–1	0.388–1	0.976	0.01–0.517	0.450	0.388–1	0.976

gw_revap.gw ¹	0.02–0.2	0.088–0.2	0.1708	0.0431–0.1477	0.1315	0.088–0.2	0.1708
revapmn.gw ³	0–500	198.699–500	320.1	0–295.299	240.1	198.700–500	320.1
sol_awc.sol ²	(-0.1)–0.1	(-0.008)–0.1	0.074	(-0.1)–0.00012	-0.001	(-0.008)–0.1	0.074
sol_k.sol ²	(-0.1)–0.1	(-0.0145)–0.1	0.045	(-0.1)–0.0015	-0.090	(-0.015)–0.1	0.045
surlag.bsn ¹	0.01–24	0.01–14.19	5.181	0.01–14.80	11.385	0.01–14.19	5.181

^{1,2} and ³ correspond to the operations replace, relative, and addition, respectively.

The results of the statistical metrics used to evaluate SWAT performance are shown in Table 3. The criteria presented by Moriasi et al. [67] were used to interpret the SWAT's performance. Regarding the NSE values, the performance of the model forced with rain gauges (ground precipitation), IMERG, and TMPA was considered "very good" for both calibration and validation.

Table 3. Statistical metrics of SWAT streamflow simulation for both calibration and validation periods.

Index	Rain Gauges		TMPA		IMERG	
	Calibration	Validation	Calibration	Validation	Calibration	Validation
NSE	0.86	0.84	0.85	0.82	0.82	0.83
Pbias	-13.2	-23.6	-11.4	-12.7	-2.6	-12.3
KGE	0.82	0.75	0.87	0.85	0.79	0.80
p-factor	0.75	0.69	0.88	0.78	0.73	0.76
r-factor	0.97	1.01	0.84	0.80	0.94	0.95

In terms of Pbias values, simulations driven by the SPPs performed better than the simulations driven by rain gauges. Both calibration and validation periods driven by SPPs presented performances classified as "good", except for the validation using IMERG that was classified as "very good". On the other hand, simulations based on rain gauges presented inferior performances. Although the simulation driven by rain gauges was classified as "good" in the calibration, the performance of the model in the validation period was lower and classified only as "satisfactory" (Pbias of -23.6%). As a result, the SWAT showed a more significant overestimation of the observed data when driven with rain gauges.

KGE results closest to 1 indicate the perfect adjustment between observed and simulated data. The simulations with TMPA showed better performance both in the calibration and validation periods (Table 3). The simulation driven by IMERG presented similar KGE values for calibration and validation, whereas simulations forced by rain gauges obtained higher KGEs in calibration than in the validation period (0.82 and 0.75, respectively).

Through the p-factor and r-factor (Table 3), it is possible to observe that all simulations presented low uncertainties according to the criteria suggested by Abbaspour et al. [59]. The results showed that the simulation using TMPA presented more reliable results than other precipitation inputs, whereas the validation of the simulation using rain gauges presented the highest uncertainty among the inputs, in which the p-factor was slightly lower than 0.7.

Although IMERG has higher statistical coefficients, the uncertainty analysis and scatters plots (Figure 5) indicate a better performance of TMPA for water resource management concerning recession streamflow. Figure 5 shows that the simulation based on IMERG underestimates peak streamflow, indicating that the use of this product in flood mitigation studies could lead to errors.

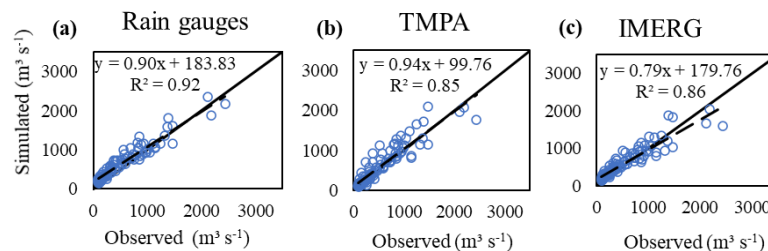


Figure 5. Scatter plots of the observed and simulated streamflows using different precipitation data sources.

The results depicted in Figure 6 show that the recession periods in the simulations driven by TMPA were better represented than both IMERG and rain gauges. This fact becomes clearer in the monthly streamflow duration curve (Figure 7), in which the streamflows with exceeding frequencies (duration) above 70% using TMPA were closer to the observed streamflow than other rainfall sources.

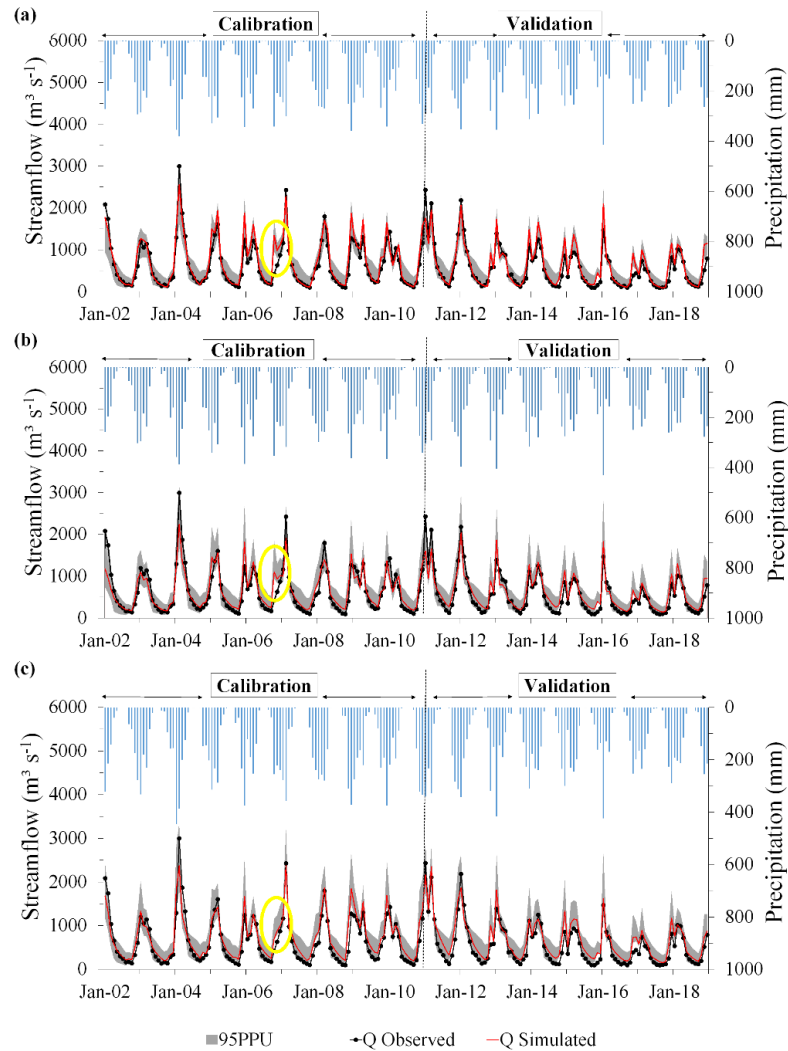


Figure 6. Observed 95% prediction uncertainty (95PPU) and simulated monthly streamflow driven by (a) TMPA, (b) IMERG, and (c) rain gauges. The yellow circle represents an anomaly in the simulated streamflow driven by SPPs.

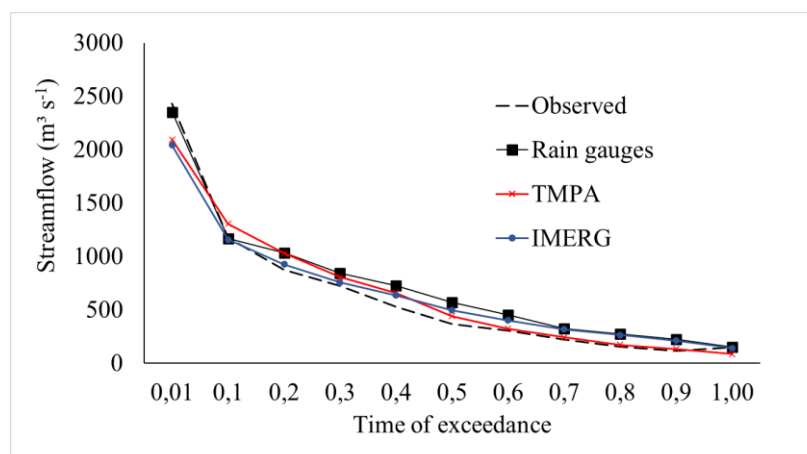


Figure 7. Monthly permanent streamflow curves using different rainfall sources and observed values.

4. Discussion

4.1. Meteorological Evaluation

The critical aspect of the SPP evaluation was the difference in spatial resolution between SPPs and rain gauges. Although Tan et al. [62] found no difference between the two approaches when comparing point-to-pixel and pixel-to-pixel in a basin located in Malaysia, the point-to-pixel approach may have been compromised due to the spatial difference between precipitation data sources and the low density of the rain gauges in the SMB, as shown in Figure 2. Furthermore, since satellite measurements represent the average value within a pixel observed in the atmosphere, whereas rain gauges generally collect point precipitation observed on the ground [62], the limitations of point-to-pixel can increase these differences [68].

RMSE, PBias, KGE, and r statistic metrics were used to assess the ability of TMPA and IMERG to represent the rainfall. Overall, both IMERG and TMPA were able to estimate rainfall in the Cerrado biome region on a monthly time scale more accurately than on a daily scale (Figure 4). Since the final versions of both SPPs were used in this study, the monthly bias corrections applied to these products before being made available may explain the best performance when used on a monthly scale. For statistical metrics referring to bias and magnitude of error, the behavior was similar to the daily data.

Gadelha et al. [7] evaluated IMERG over Brazil on a monthly basis and obtained r values higher than 0.80 in 90% of the cells on a monthly time scale, whereas a large number of cells presented r values ranging from 0.1 to 0.6 on a daily scale in central-western Brazil, where the SMB is located. The results confirmed that the use of longer time averages such as a monthly scale are more representative of the comparison between SPPs and rain gauges in Brazil. Melo et al. [15] also obtained better statistical metrics for TMPA over Brazil when evaluating on a monthly scale. Better results are expected on a monthly time scale since both IMERG and TMPA are corrected with ground precipitation data to remove monthly bias [11].

Despite improvements presented from the removal of bias, the results of Pbias for both SPPs showed an overestimation of the observed precipitation in both time scales. Similar results were obtained in other regions of the world. Su et al. [69], in a study performed with IMERG, found a slightly higher overestimation of the precipitation over Mainland China. Results obtained by Rozante et al. [70] indicate IMERG and TMPA products overestimate precipitation over Brazil.

Although TMPA presented an average Pbias value closer to zero, and showed better performance than IMERG, TMPA also showed an overestimation of precipitation over the SMB. Other studies also point to the overestimation of the precipitation estimated from TMPA. Falck et al. [1] observed overestimations of precipitation obtained from TMPA when compared to rain gauges over the Tocantins-Araguaia river basin. A similar result was obtained by Melo et al. [15] in an assessment of the general quality of TMPA 3B42 (versions 6 and 7, available at <https://disc.gsfc.nasa.gov/>) estimates over Brazil. The authors found a high level of uncertainty in the estimates of the precipitation in central-western Brazil. Despite the improvements in the 6th version compared to the 5th, it should be noted that TMPA still presented difficulties in estimating the precipitation of the Cerrado biome region.

RMSE, r , and KGE indicate that IMERG performed slightly better than TMPA in the SMB. This result can be attributed to the increasing number of passive microwave samples for measurements compared to TMPA [39]. Microwave passives samples are more accurate than infrared, and they are visible because of their sensitivity to the concentrations of ice particles or droplets associated with precipitation [71]. In addition, IMERG is more sensitive in light rainfall than TMPA, since the DPR in GPM has a sensitivity of 0.2 mm h^{-1} in the Ka-band, whereas the Precipitation Radar (PR) in the TRMM is 0.5 mm h^{-1} . Furthermore, according to Prakash et al. [4], the DPR can detect and estimate extreme precipitation more precisely than PR. The best performance demonstrated by IMERG rather than TMPA was also observed in other studies [8,63,69]. In Brazil, Rozante et al. [70] also showed that IMERG presented results that were superior to TMPA.

The r and KGE metrics showed similar results for IMERG and TMPA. However, a greater correlation was obtained between IMERG and the observed precipitation. Thus, since the TMPA data

were interrupted in 2019, IMERG has presented as a potential substitute for satellite precipitation monitoring in the Cerrado biome.

4.2. SWAT Performance Evaluation

Based on the statistical metrics NSE and Pbias, IMERG performed better among the precipitation data sources. The results obtained in this study were more accurate than those found by Monteiro et al. [6] in the Tocantins river basin, in which the SWAT was driven using remote sensing products from climatic reanalysis, Climate Forecast System Reanalysis (CFSR), and ERA-Interim. Both TMPA and IMERG performed better than the reanalysis products for the validation period.

The NSE values (Table 3) indicate that both IMERG and TMPA were able to simulate streamflow in the SMB. However, greater NSE values were obtained from IMERG. As in the Cerrado biome, studies highlighted the hydrological relevance of IMERG as well as of TMPA. Le et al. [8] simulated the monthly streamflow in six representative river basins in Vietnam, covering six sub-climate zones, using the SWAT and the SPPs TMPA, IMERG, Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Station (CHIRPS), and Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks (PERSIANN). The median NSEs obtained for all basins were 0.77 and 0.74, using IMERG and TMPA, respectively. Jiang et al. [72] performed the hydrological simulations using IMERG in comparison with TMPA over the mid-latitude humid Mishui basin in southern China. They concluded that, overall, IMERG demonstrated the best performance (NSE of 0.78), presenting a potential alternative for water resource planning and management.

Hydrological simulation with the three products overestimated the streamflow presenting negative Pbias values. The inferior performances of the simulations were observed when rain gauges were used. IMERG performed better during the calibration period, whereas the results were close to those obtained with TMPA during the validation. TMPA was able to better simulate the minimum streamflows (Figures 6 and 7) and peak streamflows (Figure 5), and thus was more suitable for the calculation of minimum streamflows (which are very important for water use in Brazil) as well as flood studies. Furthermore, since KGE offers interesting results in model performance evaluation because it uses correlation, variability, and bias [73], its values showed the best SWAT performance when coupled with TMPA.

Overall, SWAT streamflow simulations using SPPs and rain gauges presented satisfactory performances regarding uncertainty analysis. Zhu et al. [74] highlighted that uncertainty analysis is necessary to evaluate the hydrological applications of SPP datasets, since the influence of parameter uncertainty on model simulation may be greater than the effects of input data accuracy. Despite presenting adequate r-factor values (Table 3), the simulation driven by rain gauges presented higher uncertainty when compared to the SPPs, presenting a p-factor slightly lower than 0.7 for the validation period. According to Cassalho et al. [13], the local characteristic of rain gauges often limits their ability to represent the spatial structure of precipitation events. Therefore, the low density of rain gauges may be the cause of the greater uncertainties in the simulations [75].

The p-factor values for the simulations driven by TMPA were slightly larger than other precipitation sources (Table 3). It is possible to assume from the p-factor values that the 95PPU band of the simulation using TMPA (Figure 6) was capable of capturing 88% and 78% of the observed streamflows for calibration and validation, respectively. Furthermore, the r-factor values both for calibration and validation (0.84 and 0.80, respectively) were lower than those obtained with other precipitation data. Consequently, a narrower 95PPU band was generated, and less uncertainty in the fitted parameters was obtained from TMPA (Figure 6).

A higher p-factor and consequently a larger width of 95PPU could be achieved if the r-factor were high. However, greater uncertainties in outputs may arise. Hence, a balance should be reached between the two factors [59]. In this sense, a study conducted by Silva et al. [76] in three basins in the Brazilian Cerrado biome obtained larger uncertainties in streamflow simulations using the SWAT driven by rain gauges. In the validation period, the r-factor values were 1.74, 2.35, and 3.44, whereas p-factor values

were 0.87, 0.86, and 0.81, respectively [76]. This result emphasizes the reliability of SPPs for hydrological simulation in the SMB when compared with rain gauges.

The 95PPU band from the simulations driven by IMERG was capable of capturing 73% and 76% of the observed values for calibration and validation, respectively (Table 3), and presented greater uncertainties than TMPA. Such uncertainties were greater in the simulation of the recession phase of the hydrographs (dry periods), both in calibration and validation periods (Figure 6). It is possible to observe that the 95PPU band did not include the recessions that occurred in the years 2015 and 2016 the observed data. In these years, Junqueira et al. [77] observed one of the most severe droughts in the basin for the 1987–2017 period, which may have affected SWAT performance.

An anomaly in the simulations driven by SPPs was observed in October 2006 (Figure 6). Since an anomaly did not occur in the simulation driven by rain gauges, and the only difference between the model setups was the precipitation data inputs, this occurrence may have been due to false alarms (*i.e.*, when there is no precipitation recorded in rain gauges, but the satellite product records a value). As noticed by Prakash et al. [4] in southeast peninsular India, and Gadelha et al. [7] in Brazil, false alarms are probably caused by low numbers of rainy days in certain periods of the year, a situation that is normal from May to September (dry season) in the SMB.

IMERG offers a great potential for monitoring rainfall and hydrological studies in the Brazilian Cerrado biome, and is an alternative to TMPA. The high spatial resolution provided by SPPs is a significant improvement for hydrological simulations in the region with a deficient ground base rainfall monitoring. Furthermore, an improvement in IMERG data for hydrological studies can be achieved with the application of rainfall data merging methods. Neirini et al. [78] compared two non-parametric rainfall data merging methods for optimizing the hydrometeorological performance of SPPs over a tropical watershed and obtained improvements in hydrological performance over the original SPP. Thus, it is expected that the rainfall data merging methods will increase the performance of IMERG in hydrological applications and the reliable usage in the management of water resources in the Cerrado biome.

5. Conclusions

The low density of rain gauges used for validating SPPs may have been one of the reasons for some errors obtained in the study area. A greater number of gauges would provide information for a more adequate assessment of the ability of SPPs to capture the spatial variability of precipitation in the study area. Both SPPs showed similar performances in monitoring rainfall. However, the statistical metrics highlighted a slightly better performance for IMERG on daily and monthly time scales. The bias removal performed in both the final TMPA and IMERG versions was the main reason for the strong agreement between SPPs and rain gauges explained by KGE and r .

Overall, SPPs and rain gauges were able to simulate the hydrological regime in the SMB. The simulations driven by rain gauges showed higher overestimations than SPPs. The better performance of SPP products is associated with the finer spatial resolution in precipitation measurements, since the rainfall monitoring in the ground is sparse in the SMB. TMPA showed less uncertainty in the hydrological simulations (p -factor and r -factor) and more adequately captured hydrological behavior than IMERG. IMERG showed less ability than TMPA in simulating peak streamflows, which may compromise its application for some purposes such as flood forecasting. The rainfall data merging methods may assist in overcoming this limitation and could improve SPP performance.

IMERG demonstrated a strong potential for replacing TMPA in the estimation of precipitation over the SMB since TMPA was discontinued in 2019. In addition, SPPs present a potential application for hydrological modeling and water resource management in the Brazilian Cerrado biome.

Author Contributions: Conceptualization, J.d.S.A. and M.R.V.; Data curation, J.d.S.A.; Methodology, J.d.S.A. and M.R.V.; Supervision, J.d.S.A., M.R.V., and C.R.d.M.; Writing—original draft, J.d.S.A., M.R.V., R.J., V.A.d.O., and C.R.d.M.; Writing—review & editing, J.d.S.A., M.R.V., R.J., V.A.d.O., and C.R.d.M. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: We would like to thank the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior—CAPES for the scholarships granted to the authors J.d.S.A. [grant number 88882.446854/2019-01], R.J. [grant number 88882.446869/2019-01], and V.A.d.O. [grant number 88882.306661/2018-01].

Acknowledgments: We greatly acknowledge the Brazilian National Water Agency (ANA), the Brazilian National Institute of Meteorology (INMET), and the National Aeronautics and Space Administration (NASA) for providing the input data to develop this study. We also acknowledge CAPES for granting scholarships to the first, third, and fourth authors, and CNPq for granting fellowship of research productivity (PQ) to the second and fifth authors.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Falck, A.S.; Maggioni, V.; Tomasella, J.; Vila, D.A.; Diniz, F.L.R. Propagation of satellite precipitation uncertainties through a distributed hydrologic model: A case study in the Tocantins–Araguaia basin in Brazil. *J. Hydrol.* **2015**, *527*, 943–957, doi:10.1016/j.jhydrol.2015.05.042.
2. Hobouchian, M.P.; Salio, P.; García Skabar, Y.; Vila, D.; Garreaud, R. Assessment of satellite precipitation estimates over the slopes of the subtropical Andes. *Atmos. Res.* **2017**, *190*, 43–54, doi:10.1016/j.atmosres.2017.02.006.
3. Tapiador, F.J.; Turk, F.J.; Petersen, W.; Hou, A.Y.; García-Ortega, E.; Machado, L.A.T.; Angelis, C.F.; Salio, P.; Kidd, C.; Huffman, G.J.; et al. Global precipitation measurement: Methods, datasets and applications. *Atmos. Res.* **2012**, *104–105*, 70–97, doi:10.1016/j.atmosres.2011.10.021.
4. Prakash, S.; Mitra, A.K.; AghaKouchak, A.; Liu, Z.; Norouzi, H.; Pai, D.S. A preliminary assessment of GPM-based multi-satellite precipitation estimates over a monsoon dominated region. *J. Hydrol.* **2018**, *556*, 865–876, doi:10.1016/j.jhydrol.2016.01.029.
5. Salio, P.; Hobouchian, M.P.; García Skabar, Y.; Vila, D. Evaluation of high-resolution satellite precipitation estimates over southern South America using a dense rain gauge network. *Atmos. Res.* **2015**, *163*, 146–161, doi:10.1016/j.atmosres.2014.11.017.
6. Monteiro, J.A.F.; Strauch, M.; Srinivasan, R.; Abbaspour, K.C.; Gücker, B. Accuracy of grid precipitation data for Brazil: Application in river discharge modelling of the Tocantins catchment. *Hydrol. Process.* **2016**, *30*, 1419–1430, doi:10.1002/hyp.10708.
7. Gadelha, A.N.; Coelho, V.H.R.; Xavier, A.C.; Barbosa, L.R.; Melo, D.C.D.; Xuan, Y.; Huffman, G.J.; Petersen, W.A.; Almeida, C.D.N. Grid box-level evaluation of IMERG over Brazil at various space and time scales. *Atmos. Res.* **2019**, *218*, 231–244, doi:10.1016/j.atmosres.2018.12.001.
8. Le, M.H.; Lakshmi, V.; Bolten, J.; Bui, D. Du Adequacy of Satellite-derived Precipitation Estimate for Hydrological Modeling in Vietnam Basins. *J. Hydrol.* **2020**, *586*, 124820, doi:10.1016/j.jhydrol.2020.124820.
9. De Paiva, R.C.D.; Buarque, D.C.; Collischonn, W.; Bonnet, M.-P.; Frappart, F.; Calmant, S.; Bulhões Mendes, C.A. Large-scale hydrologic and hydrodynamic modeling of the Amazon River basin. *Water Resour. Res.* **2013**, *49*, 1226–1243, doi:10.1002/wrcr.20067.
10. Wang, Z.; Zhong, R.; Lai, C.; Chen, J. Evaluation of the GPM IMERG satellite-based precipitation products and the hydrological utility. *Atmos. Res.* **2017**, *196*, 151–163, doi:10.1016/j.atmosres.2017.06.020.
11. Huffman, G.J.; Bolvin, D.T.; Nelkin, E.J.; Wolff, D.B.; Adler, R.F.; Gu, G.; Hong, Y.; Bowman, K.P.; Stocker, E.F. The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-Global, Multiyear, Combined-Sensor Precipitation Estimates at Fine Scales. *J. Hydrometeorol.* **2007**, *8*, 38–55, doi:10.1175/JHM560.1.
12. Huffman, G.J.; Bolvin, D.T.; Nelkin, E.J.; Tan, J. Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM (IMERG) Technical Documentation. *J. ISMAC* **2019**, *1*, doi:10.36548/jismac.2019.2.
13. Cassalho, F.; Daleles Rennó, C.; Bosco Coura dos Reis, J.; Cláudio da Silva, B. Hydrologic Validation of MERGE Precipitation Products over Anthropogenic Watersheds. *Water* **2020**, *12*, 1268, doi:10.3390/w12051268.
14. Collischonn, B.; Collischonn, W.; Tucci, C.E.M. Daily hydrological modeling in the Amazon basin using TRMM rainfall estimates. *J. Hydrol.* **2008**, *360*, 207–216, doi:10.1016/j.jhydrol.2008.07.032.
15. de Melo, D.C.D.; Xavier, A.C.; Bianchi, T.; Oliveira, P.T.S.; Scanlon, B.R.; Lucas, M.C.; Wendland, E. Performance evaluation of rainfall estimates by TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis 3B42V6 and V7 over Brazil. *J. Geophys. Res. Atmos.* **2015**, *120*, 9426–9436, doi:10.1002/2015JD023797.
16. Coelho, V.H.R.; Montenegro, S.; Almeida, C.N.; Silva, B.B.; Oliveira, L.M.; Gusmão, A.C. V.; Freitas, E.S.; Montenegro, A.A.A. Alluvial groundwater recharge estimation in semi-arid environment using remotely sensed data. *J. Hydrol.* **2017**, *548*, 1–15, doi:10.1016/j.jhydrol.2017.02.054.

17. Worqlul, A.W.; Yen, H.; Collick, A.S.; Tilahun, S.A.; Langan, S.; Steenhuis, T.S. Evaluation of CFSR, TMPA 3B42 and ground-based rainfall data as input for hydrological models, in data-scarce regions: The upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Catena* **2017**, *152*, 242–251, doi:10.1016/j.catena.2017.01.019.
18. Tang, G.; Zeng, Z.; Long, D.; Guo, X.; Yong, B.; Zhang, W.; Hong, Y. Statistical and Hydrological Comparisons between TRMM and GPM Level-3 Products over a Midlatitude Basin: Is Day-1 IMERG a Good Successor for TMPA 3B42V7? *J. Hydrometeorol.* **2016**, *17*, 121–137, doi:10.1175/JHM-D-15-0059.1.
19. Zubieta, R.; Getirana, A.; Espinoza, J.C.; Lavado-Casimiro, W.; Aragon, L. Hydrological modeling of the Peruvian-Ecuadorian Amazon Basin using GPM-IMERG satellite-based precipitation dataset. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **2017**, *21*, 3543–3555, doi:10.5194/hess-21-3543-2017.
20. Amjad, M.; Yilmaz, M.T.; Yucel, I.; Yilmaz, K.K. Performance evaluation of satellite- and model-based precipitation products over varying climate and complex topography. *J. Hydrol.* **2020**, *584*, 124707, doi:10.1016/j.jhydrol.2020.124707.
21. Dinku, T.; Chidzambwa, S.; Ceccato, P.; Connor, S.J.; Ropelewski, C.F. Validation of high-resolution satellite rainfall products over complex terrain. *Int. J. Remote Sens.* **2008**, *29*, 4097–4110, doi:10.1080/01431160701772526.
22. Hu, Q.; Yang, D.; Wang, Y.; Yang, H. Accuracy and spatio-temporal variation of high resolution satellite rainfall estimate over the Ganjiang River Basin. *Sci. China Technol. Sci.* **2013**, *56*, 853–865, doi:10.1007/s11431-013-5176-7.
23. Jiang, S.H.; Ren, L.L.; Yong, B.; Yang, X.L.; Shi, L. Evaluation of high-resolution satellite precipitation products with surface rain gauge observations from Laohahe Basin in northern China. *Water Sci. Eng.* **2010**, *3*, 405–417, doi:10.3882/j.issn.1674-2370.2010.04.004.
24. Eini, M.R.; Javadi, S.; Delavar, M.; Monteiro, J.A.F.; Darand, M. High accuracy of precipitation reanalyses resulted in good river discharge simulations in a semi-arid basin. *Ecol. Eng.* **2019**, *131*, 107–119, doi:10.1016/j.ecoleng.2019.03.005.
25. Bitew, M.M.; Gebremichael, M. Evaluation of satellite rainfall products through hydrologic simulation in a fully distributed hydrologic model. *Water Resour. Res.* **2011**, *47*, 1–11, doi:10.1029/2010WR009917.
26. Lobligeois, F.; Andréassian, V.; Perrin, C.; Tabary, P.; Loumagne, C. When does higher spatial resolution rainfall information improve streamflow simulation? An evaluation using 3620 flood events. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **2014**, *18*, 575–594, doi:10.5194/hess-18-575-2014.
27. Oliveira, V.A.; Mello, C.R. De; Beskow, S.; Viola, M.R.; Srinivasan, R. Modeling the effects of climate change on hydrology and sediment load in a headwater basin in the Brazilian Cerrado biome. *Ecol. Eng.* **2019**, *133*, 20–31, doi:10.1016/j.ecoleng.2019.04.021.
28. Silva, J.P.M.; da Silva, M.L.M.; da Silva, E.F.; da Silva, G.F.; de Mendonça, A.R.; Cabacinha, C.D.; Araújo, E.F.; Santos, J.S.; Vieira, G.C.; de Almeida, M.N.F.; et al. Computational techniques applied to volume and biomass estimation of trees in Brazilian savanna. *J. Environ. Manage.* **2019**, *249*, 109368, doi:10.1016/j.jenvman.2019.109368.
29. Nobrega, R.L.B.; Guzha, A.C.; Torres, G.N.; Kovacs, K.; Lamparter, G.; Amorim, R.S.S.; Couto, E.; Gerold, G. Identifying Hydrological Responses of Micro-Catchments under Contrasting Land Use in the Brazilian Cerrado. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* **2015**, *12*, 9915–9975, doi:10.5194/hessd-12-9915-2015.
30. Myers, N.; Mittermeier, R.A.; Mittermeier, C.G.; Fonseca, G.A.B.; Kent, J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature* **2000**, *403*, 853.
31. Oliveira, P.T.S.; Nearing, M.A.; Moran, M.S.; Goodrich, D.C.; Wendland, E.; Gupta, H. V Trends in water balance components across the Brazilian Cerrado. *Water Resour. Res.* **2014**, *50*, 7100–7114, doi:10.1002/2013WR015202.
32. Machado, A.R.; Wendland, E.; Krause, P. Hydrologic Simulation for Water Balance Improvement in an Outcrop Area of the Guarani Aquifer System. *Environ. Process.* **2016**, *3*, 19–38, doi:10.1007/s40710-016-0128-4.
33. Lima, J.E.F.W.; da Silva, E.M. Estimativa da contribuição hídrica superficial do Cerrado para as grandes regiões hidrográficas brasileiras. In *XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. ABRH: São Paulo, Brazil, **2007**, 1–13.
34. Agência Nacional de Águas—ANA—Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos. Conjuntura Dos Recursos Hídricos no Brasil: Regiões Hidrográficas Brasileiras—Edição Especial 2015. Available online: <http://arquivos.ana.gov.br/institucional/sge/CEDOC/Catalogo/2015/ConjunturaDosRecursosHidricosNoBrasil2015.pdf> (accessed on 12 June 2019).

35. Xavier, A.C.; King, C.W.; Scanlon, B.R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013). *Int. J. Climatol.* **2016**, *36*, 2644–2659, doi:10.1002/joc.4518.
36. Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil)—ANEEL Banco de Informações de Geração (BIG). Available online: <https://bit.ly/2IGf4Q0> (accessed on 12 June 2019).
37. Thiengo, S.C.; Santos, S.B.; Fernandez, M.A. Malacofauna límnic da área de influência do lago da usina hidrelétrica de Serra da Mesa, Goiás, Brasil. I. Estudo qualitativo. *Rev. Bras. Zool.* **2005**, *22*, 867–874, doi:10.1590/S0101-81752005000400010.
38. Alvares, C.A.; Stape, J.L.; Sentelhas, P.C.; De Moraes Gonçalves, J.L.; Sparovek, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorol. Z.* **2013**, *22*, 711–728, doi:10.1127/0941-2948/2013/0507.
39. Hou, A.Y.; Kakar, R.K.; Neeck, S.; Azarbarzin, A.A.; Kummerow, C.D.; Kojima, M.; Oki, R.; Nakamura, K.; Iguchi, T. The Global Precipitation Measurement Mission. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **2014**, *95*, 701–722, doi:10.1175/BAMS-D-13-00164.1.
40. Neitsch, S.L.; Arnold, J.G.; Kiniry, J.R.; Williams, J.R. *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation version 2009*. Technical Report No.406; Texas Water Resources Institute: Forney, TX, USA, 2011.
41. Arnold, J.G.; Srinivasan, R.; Muttiah, R.S.; Williams, J.R. Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development. *J. Am. Water Resour. Assoc.* **1998**, *34*, 73–89, doi:10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x.
42. 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.; et al. SWAT: Model Use, Calibration, and Validation. *Trans. ASABE* **2012**, *55*, 1491–1508, doi:10.13031/2013.42256.
43. PRIESTLEY, C.H.B.; TAYLOR, R.J. On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-Scale Parameters. *Mon. Weather Rev.* **1972**, *100*, 81–92, doi:10.1175/1520-0493(1972)100<0081:otaosh>2.3.co;2.
44. Hargreaves, G.H. Moisture Availability and Crop Production. *Trans. ASABE* **1975**, *18*, 0980–0984, doi:10.13031/2013.36722.
45. Penman, H.L. Evaporation: An Introductory Survey. *Neth. J. Agric. Sci.* **1956**, *4*, 9–29.
46. Monteith, J.L. Evaporation and environment. *Symp. Soc. Exp. Biol.* **1965**, 205–234.
47. Green, W.H.; Ampt, G.A. Studies on Soil Physics. *J. Agric. Sci.* **1911**, *4*, 1–24, doi:10.1017/S0021859600001441.
48. United States Department of Agriculture – Soil Conservation Service (USDA-SCS) Section 4: Hydrology. In *National Engineering Handbook*; United States Department of Agriculture: Washington, DC, USA, 1972.
49. Neitsch, S.L.; Arnold, J.G.; Kiniry, J.R.; Williams, J.R. *Soil and Water Assessment Tool User's Manual Version 2005*; Technical Report No. 406; Texas Water Resources Institute: Forney, TX, USA, 2005.
50. Srinivasan, R.; Ramanarayanan, T.S.; Arnold, J.G.; Bednarz, S.T. Large area hydrologic modeling and assessment part II: Model application. *J. Am. Water Resour. Assoc.* **1998**, *34*, 91–101, doi:10.1111/j.1752-1688.1998.tb05962.x.
51. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) Mapa de Solos do Brasil. Available online: http://geoinfo.cnps.embrapa.br/layers/geonode%3A solos_br5m_2011_lat_long_wgs84. (accessed on 14 December 2019).
52. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística — IBGE Mudanças na Cobertura e Uso da Terra 2000. 2010–2012. Available online: http://maps.lapig.iesa.ufg.br/?layers=pa_br_uso_solo_500_ibge (accessed on 14 December 2019).
53. Abbaspour, K.C.; Yang, J.; Maximov, I.; Siber, R.; Bogner, K.; Mieleitner, J.; Zobrist, J.; Srinivasan, R. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *J. Hydrol.* **2007**, *333*, 413–430, doi:10.1016/j.jhydrol.2006.09.014.
54. Guilhon, L.G.F.; Rocha, V.F.; Moreira, J.C. Comparação de Métodos de Previsão de Vazões Naturais Afluentes a Aproveitamentos Hidroelétricos. *Rev. Bras. Recur. Hídricas* **2007**, *12*, 13–20.
55. Oliveira, V.A.; de Mello, C.R.; Viola, M.R.; Srinivasan, R. Assessment of climate change impacts on streamflow and hydropower potential in the headwater region of the Grande river basin, Southeastern Brazil. *Int. J. Climatol.* **2017**, *37*, 5005–5023, doi:10.1002/joc.5138.
56. Nóbrega, M.T.; Collischonn, W.; Tucci, C.E.M.; Paz, A.R. Uncertainty in climate change impacts on water resources in the Rio Grande Basin, Brazil. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **2011**, *15*, 585–595, doi:10.5194/hess-15-585-2011.
57. Abbaspour, K.C. SWAT-CUP: SWAT Calibration and Uncertainty Programs – a User Manual 2015. Available online: https://swat.tamu.edu/media/114860/usermanual_swatcup.pdf (accessed on 14 December 2019).

58. Abbaspour, K.C.; Johnson, C.A.; van Genuchten, M.T. Estimating Uncertain Flow and Transport Parameters Using a Sequential Uncertainty Fitting Procedure. *Vadose Zo. J.* **2004**, *3*, 1340–1352, doi:10.2136/vzj2004.1340.
59. 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. *J. Hydrol.* **2015**, *524*, 733–752, doi:10.1016/j.jhydrol.2015.03.027.
60. Triana, J.S.A.; Chu, M.L.; Guzman, J.A.; Moriasi, D.N.; Steiner, J.L. Beyond model metrics: The perils of calibrating hydrologic models. *J. Hydrol.* **2019**, *578*, 124032, doi:10.1016/j.jhydrol.2019.124032.
61. Rodrigues, J.A.M.; Viola, M.R.; Alvarenga, L.A.; Mello, C.R. de; Chou, S.C.; de Oliveira, V.A.; Uddameri, V.; Morais, M.A.V. Climate change impacts under representative concentration pathway scenarios on streamflow and droughts of basins in the Brazilian Cerrado biome. *Int. J. Climatol.* **2019**, 1–16, doi:10.1002/joc.6347.
62. Tan, M.; Samat, N.; Chan, N.; Roy, R. Hydro-Meteorological Assessment of Three GPM Satellite Precipitation Products in the Kelantan River Basin, Malaysia. *Remote Sens.* **2018**, *10*, 1011, doi:10.3390/rs10071011.
63. Hosseini-Moghari, S.-M.; Tang, Q. Validation of GPM IMERG-V05 and V06 precipitation products over Iran. *J. Hydrometeorol.* **2020**, doi:10.1175/JHM-D-19-0269.1.
64. Wei, G.; Lü, H.; Crow, W.T.; Zhu, Y.; Wang, J.; Su, J. Evaluation of satellite-based precipitation products from IMERG V04A and V03D, CMORPH and TMPA with gauged rainfall in three climatologic zones in China. *Remote Sens.* **2018**, *10*, 30, doi:10.3390/rs10010030.
65. Muhammad, E.; Muhammad, W.; Ahmad, I.; Muhammad Khan, N.; Chen, S. Satellite precipitation product: Applicability and accuracy evaluation in diverse region. *Sci. China Technol. Sci.* **2020**, doi:10.1007/s11431-019-1457-3.
66. Kling, H.; Fuchs, M.; Paulin, M. Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios. *J. Hydrol.* **2012**, *424–425*, 264–277, doi:10.1016/j.jhydrol.2012.01.011.
67. Moriasi, D.N.; Arnold, J.G.; Van Liew, M.W.; Bingner, R.L.; Harmel, R.D.; Veith, T.L. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Trans. ASABE* **2007**, *50*, 885–900, doi:10.13031/2013.23153.
68. Zad, S.N.M.; Zulkafli, Z.; Muharram, F.M. Satellite rainfall (TRMM 3B42-V7) performance assessment and adjustment over Pahang river basin, Malaysia. *Remote Sens.* **2018**, *10*, 388, doi:10.3390/rs10030388.
69. Su, J.; Haishen, L.; Ryu, D.; Zhu, Y. The Assessment and Comparison of TMPA and IMERG Products Over the Major Basins of Mainland China. *Earth Sp. Sci.* **2019**, *6*, 2461–2479, doi:10.1029/2019EA000977.
70. Rozante, J.R.; Vila, D.A.; Chiquetto, J.B.; de Fernandes, A.A.; Alvim, D.S. Evaluation of TRMM/GPM blended daily products over Brazil. *Remote Sens.* **2018**, *10*, 882, doi:10.3390/rs10060882.
71. Varma, A.K. Varma, A.K. B. Measurement of Precipitation from Satellite Radiometers (Visible, Infrared, and Microwave): Physical Basis, Methods, and Limitations. In *Remote Sensing of Aerosols, Clouds, and Precipitation*; Islam, T., Hu, Y., Kokhanovsky, A., Wang; Elsevier: University of Iowa, Iowa City, IA, United States, 2018; pp. 223–248. ISBN 9780128104385.
72. Jiang, S.; Ren, L.; Xu, C.Y.; Yong, B.; Yuan, F.; Liu, Y.; Yang, X.; Zeng, X. Statistical and hydrological evaluation of the latest Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG) over a midlatitude humid basin in South China. *Atmos. Res.* **2018**, *214*, 418–429, doi:10.1016/j.atmosres.2018.08.021.
73. Correa, S.W.; de Paiva, R.C.D.; Siqueira, V.; Collischonn, W.; Paiva, R.C.D.; Siqueira, V.; Collischonn, W. Hydrological reanalysis across the 20th century: A case study of the Amazon Basin. *J. Hydrol.* **2019**, *570*, 755–773, doi:10.1016/j.jhydrol.2019.01.025.
74. Zhu, H.; Li, Y.; Huang, Y.; Li, Y.; Hou, C.; Shi, X. Evaluation and hydrological application of satellite-based precipitation datasets in driving hydrological models over the Huifa river basin in Northeast China. *Atmos. Res.* **2018**, *207*, 28–41, doi:10.1016/j.atmosres.2018.02.022.
75. Li, D.; Christakos, G.; Ding, X.; Wu, J. Adequacy of TRMM satellite rainfall data in driving the SWAT modeling of Tiaoxi catchment (Taihu lake basin, China). *J. Hydrol.* **2018**, *556*, 1139–1152, doi:10.1016/j.jhydrol.2017.01.006.
76. Da Silva, R.M.; Dantas, J.C.; de Beltrão, J.A.; Santos, C.A.G. Hydrological simulation in a tropical humid basin in the cerrado biome using the SWAT model. *Hydrol. Res.* **2018**, *49*, 908–923, doi:10.2166/nh.2018.222.
77. Junqueira, R.; Viola, M.R.; de Mello, C.R.; Vieira-Filho, M.; Alves, M.V.G.; da Amorim, J.S. Drought severity indexes for the Tocantins River Basin, Brazil. *Theor. Appl. Climatol.* **2020**, *141*, 465–481, doi:10.1007/s00704-020-03229-w.

78. Nerini, D.; Zulkafli, Z.; Wang, L.P.; Onof, C.; Buytaert, W.; Lavado-Casimiro, W.; Guyot, J.L. A comparative analysis of TRMM–rain gauge data merging techniques at the daily time scale for distributed rainfall–runoff modeling applications. *J. Hydrometeorol.* **2015**, *16*, 2153–2168, doi:10.1175/JHM-D-14-0197.1.

ARTIGO 2 – REANÁLISES CLIMÁTICAS DO SÉCULO XX APLICADAS A MODELAGEM HIDROLÓGICA NO CERRADO BRASILEIRO

Jhones da Silva Amorim¹, Marcelo Ribeiro Viola¹

¹ Laboratório de Hidráulica, Departamento de Recursos Hídricos, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Lavras, Caixa Postal 3037, CEP 37200-900, Lavras, Minas Gerais, Brasil.

Artigo redigido conforme a norma para publicação periódica científica NBR 6022 (ABNT, 2018), seguindo o manual da UFLA de apresentação de Teses.

Resumo: A identificação e entender a ocorrência de eventos hidroclimáticos passados é necessário para a compreensão dos eventos que podem ocorrer no presente e no futuro afim de subsidiar a gestão dos recursos hídricos. Como resultado da evolução dos modelos de previsão climática, as reanálises climáticas que se iniciam no século XX têm sido utilizadas para essa finalidade. Contudo, a maioria dos estudos com reanálise climática são no campo da climatologia e a aplicabilidade dessa base de dados na hidrologia ainda carece de investigação, especialmente em áreas de relevância como o Cerrado brasileiro. Assim, objetivou-se com esse estudo avaliar a capacidade das reanálises hidrológicas 20CRv3, ERA-20CM e ERA-20C para a estimativa da precipitação e simulação hidrológica da vazão em uma bacia hidrográfica do Cerrado brasileiro. A simulação hidrológica foi realizada com o *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) previamente calibrado com o *TRMM - Multi-satellite Precipitation Analysis e Climatic Research Unit*. A capacidade de estimar a precipitação foi realizada comparando as reanálises com pluviômetros. De maneira geral, o ERA-20CM apresentou coeficientes estatísticos inferiores ao 20CRv3 e ERA-20C na estimativa da precipitação em bases diária e mensal devido à ausência de assimilação de dados observados. Para a simulação de vazão, todos os membros do ERA-20CM apresentaram desempenho “insatisfatório”. Entre o ERA-20C e 20CRv3, o segundo simulou mais adequadamente a vazão e foi utilizada para criar a hidrógrafa ao longo do século XX. De forma geral, a utilização das reanálises permitiu a identificação de eventos de seca e cheia, entretanto alguns eventos foram negligenciados pela simulação. Desta forma, as reanálises têm potencial para recriar a vazão ao longo do século XX, contudo é recomendada a validação desta base de dados com séries temporais mais extensas.

Palavras-Chave: Simulação Hidrológica; Pontos de Mudança. Reanálise Hidrológica.

1 INTRODUÇÃO

O entendimento da variabilidade hidrológica no tempo e espaço é de fundamental importância para a gestão adequada dos recursos hídricos e, conseqüentemente, diversas áreas correlatas, tais como geração de energia, serviços ecossistêmicos, desastres ambientais, dentre outros (ALFIERI et al., 2020; CORREA et al., 2019). A compreensão da dinâmica hidrológica pode ser alcançada por meio da modelagem hidrológica de forma auxiliar na gestão dos recursos hídricos. Entretanto, a aplicação de modelos hidrológicos é fortemente dependente da disponibilidade de dados de precipitação que é um dos principais componentes do ciclo hidrológico (AMORIM et al., 2020).

Os dados de precipitação fornecidos aos modelos hidrológicos são frequentemente observacionais, monitorados em postos pluviométricos. Embora seja a base de dados mais confiável, a baixa densidade de postos pluviométricos em países em desenvolvimento pode tornar a representação espacial da precipitação inadequada (FALCK et al., 2015). Uma alternativa aos dados observacionais são os produtos de precipitação obtidos por meio de sensores a bordo de satélites orbitais, os quais podem solucionar a questão da representatividade espacial da precipitação. Produtos mais recentes como o *TRMM Multisatellite Precipitation Analysis – TMPA* (HUFFMAN et al., 2010) e *GPM Integrated Multi-Satellite Retrievals for GPM – IMERG* (HUFFMAN et al., 2019) fornecem informações com resolução espacial e temporal suficientes para fins de modelagem hidrológica em grandes bacias hidrográficas. Visto que as informações provenientes de satélites estão disponíveis a partir de meados do século XX, a modelagem hidrológica de longo termo, objetivando a análise do comportamento hidrológico secular, ainda requer dados de precipitação disponíveis para o início do século, o que permanece um desafio em várias regiões.

As reanálises climáticas constituem outras fontes de dados de precipitação e despontam cada vez mais como alternativas para suprir a ausência de dados para o começo do século XX. Slivinski *et al.* (2021) destacaram que o conhecimento detalhado das condições climáticas passadas é fundamental para entender e prever as mudanças que podem vir a ocorrer. Assim, as reanálises climáticas buscam recriar o clima, mantendo as tendências climáticas gerais (LALOYLAUX et al., 2018). A reanálise climática envolve um modelo de previsão climática moderno; observações de campo de diversas fontes disponíveis para o período tais como balões atmosféricos, barcos, boias, entre outros; e um sistema de assimilação de dados para obtenção da melhor estimativa do estado atmosférico (FUJIWARA et al., 2017).

As principais reanálises climáticas vem sendo desenvolvidas por U.S. *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP), *Japan Meteorological Agency* (JMA), *NASA Global Modeling and Assimilation Office* (GMAO) e *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) (HERSBACH et al., 2015). Essas reanálises climáticas iniciam antes da era dos satélites e tem sido aplicadas para diferentes finalidades, inclusive na América do Sul, onde há escassez de dados observacionais (GOZZO et al., 2019; PRADO et al., 2021).

A maioria dos estudos com reanálises são aplicados às questões climatológicas e poucos avaliaram a aplicabilidade dessas séries de dados na modelagem hidrológica. Correa *et al.* (2017) avaliaram diferentes reanálises para estudar cheias e secas na bacia do rio Amazonas. Correa *et al.* (2019), também na Amazonia, combinaram dados de reanálise com assimilação de dados de vazão para uma reanálise hidrológica ao longo do século XX. Neste sentido, é fundamental o desenvolvimento de estudos que avaliem essas bases de dados em locais estratégicos da América do Sul.

Uma destas regiões é o bioma Cerrado que cobre aproximadamente 22% do território brasileiro (OLIVEIRA et al., 2015). Esse bioma desempenha um papel importante na disponibilidade hídrica e geração de energia elétrica uma vez que nele encontram-se as cabeceiras das principais bacias hidrográficas do país (OLIVEIRA et al., 2019). Além disso, o Cerrado é um dos biomas com maior riqueza de espécies e endemismo do mundo (SILVA et al., 2019). Apesar de sua relevância socioeconômica e ecossistêmica, o Cerrado tem passado por conflitos devido à expansão das fronteiras agrícola e pecuária no Brasil (NOBREGA et al., 2015). Tais características tornam o Cerrado um dos *hotspots* mundiais de biodiversidade (MYERS et al., 2000).

Neste contexto, objetivou-se analisar a capacidade das reanálises climáticas ERA-20CM, ERA-20C e 20CRv3 para o desenvolvimento de estudos hidrológicos em uma bacia hidrográfica localizada no bioma Cerrado. Para isso, dados de precipitação obtidos por reanálise foram comparados com dados observacionais e, posteriormente, aplicados para a modelagem da bacia hidrográfica do rio Tocantins, com o emprego do modelo hidrológico SWAT. A fim de identificar a disponibilidade hídrica e os pontos de mudança abrupta na série temporal, a reanálise com melhor desempenho foi utilizada para simular a vazão ao longo do século XX.

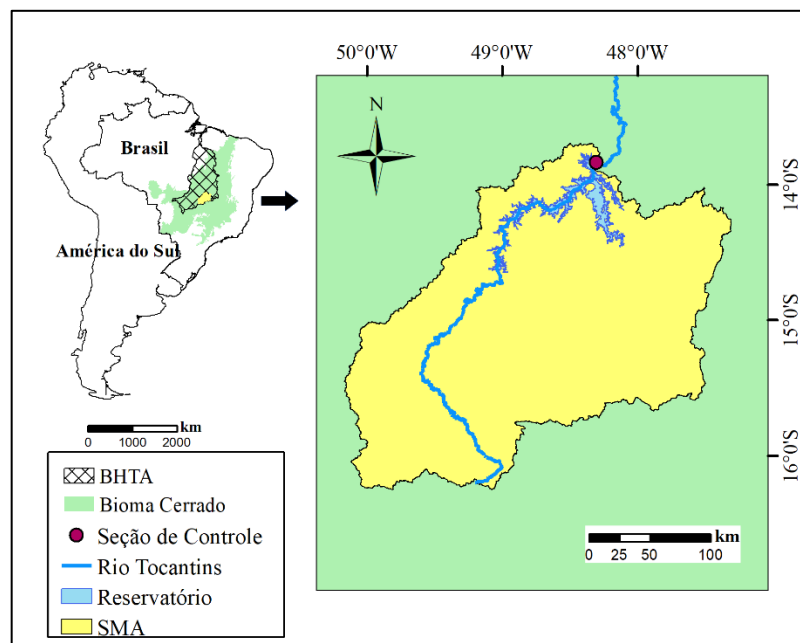
2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de Estudo

O estudo foi realizado em uma região da cabeceira da bacia hidrográfica do rio Tocantins-Araguaia (BHTA) localizada na região central do Brasil. BHTA é a maior bacia hidrográfica totalmente inserida no Brasil (MONTEIRO et al., 2016) com aproximadamente 764.000 km². Ela é fundamental para o abastecimento de água, irrigação de áreas agrícolas e geração de energia hidrelétrica. Segundo Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA (2015), 13,14 GW da capacidade hidrelétrica instalada no Brasil está localizada na BHTA, o que corresponde a aproximadamente a 15%.

A seção de controle utilizada para simulação hidrológica drena 51238 km² localizados a montante da usina hidrelétrica de Serra da Mesa (SMA) (FIGURA 1). Além dos 1275 MW gerados na planta hidrelétrica (10% do total gerado em BHTA) (ANEEL, 2018), o reservatório de Serra da Mesa é o maior do Brasil em volume armazenado (THIENGO et al., 2005) e desempenha um papel importante na regulação da vazão para a cascata de usinas hidrelétricas a fio d'água de Cana Brava e Lajeado (JUNQUEIRA et al., 2020).

Figura 1 – Localização da Área de Drenagem de Serra da Mesa (SMA) na Bacia Hidrográfica do Tocantins – Araguaia (BHTA) e bioma Cerrado.

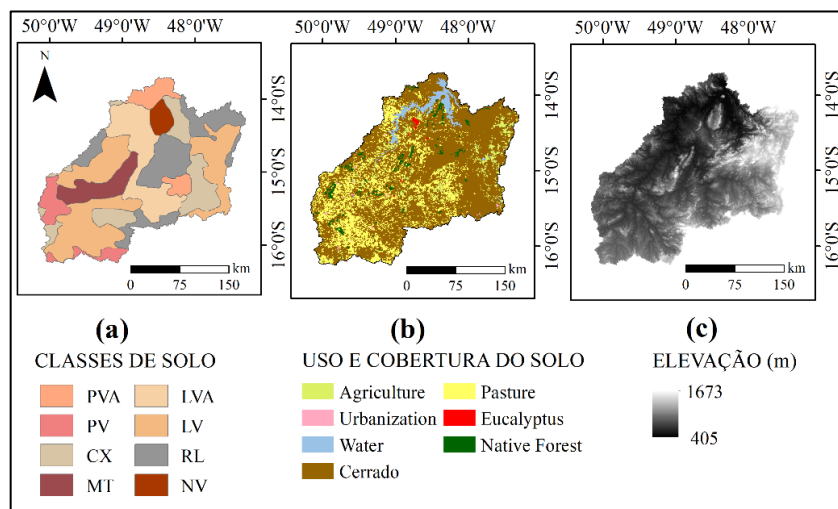


Fonte: Do Autor (2021).

De acordo com informações do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2015), a vegetação de SMA é composta por Cerrado, áreas agrícolas e pastagem as quais

correspondem a 67,14%, 22,17% e 4,56%, respectivamente, da área total (FIGURA 2). As demais áreas são cobertas por corpos hídricos (3,38%), florestas (2,22%) e áreas urbanas ou silvicultura (0,53%). Em relação aos tipos de solos da área de estudo, a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – (EMBRAPA, 2011) aponta a predominância dos Latossolo Vermelho (LV), Nitossolo Litólico (RL) e Latossolo Vermelho-amarelo com ocorrência de 31,02%, 18,92% e 15,13%, respectivamente (FIGURA 2). Outros tipos de solos ocorrem em menores percentuais na SMA, tais como o Cambissolo Háptico (CX – 13,84%), Chernossolo Argilúvico (MT – 6,91%), Argissolo Vermelho-amarelo (PVA – 5,85%), Argissolo Vermelho (PV – 5,62%) e Nitossolo Vermelho (NV – 2,71%). A altitude varia de 405 m a 1673 m.

Figura 2. Mapas de Classe de solo (a), Uso e ocupação do solo (b) e Elevação em SMA (c).



Fonte: Do Autor (2021).

A SMA está localizada em uma região sob forte influência do sistema sul-americano de monção que é responsável (PRADO et al., 2021). O clima é do tipo Tropical Savana (Aw) de acordo com a classificação climática de Köppen (ALVARES et al., 2013) apresentando invernos secos. De acordo com as normais climatológicas 1981-2010 a precipitação média anual na SMA é aproximadamente 1400 mm e a evapotranspiração potencial média anual é em torno de 1550 mm. A estação chuvosa estende-se de outubro a abril, na qual ocorre cerca de 90% da precipitação, sendo que o pico da precipitação ocorre durante os meses de dezembro, janeiro e fevereiro. A temperatura máxima média anual é em torno de 31°C enquanto a mínima média anual é cerca de 18°C.

2.2 Modelo Hidrológico

O modelo hidrológico *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) foi utilizado para a simulação da vazão. O SWAT é um modelo fisicamente baseado, semidistribuído e contínuo no tempo desenvolvido pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos para o estudo do impacto das alterações no uso do solo e práticas de manejo sobre a vazão e produção de sedimentos em bacias hidrográficas (ARNOLD et al., 1998). O SWAT divide a bacia em sub-bacias que, posteriormente, são subdivididas em Unidades de Resposta Hidrológicas (URH).

As URH são entendidas como áreas homogêneas em relação ao uso do solo, características topográficas e tipo de solo (GASSMAN et al., 2007). Para cada URH o ciclo hidrológico é calculado conforme a Equação 1, acumulado para sub-bacia e o escoamento é propagado até a saída da bacia por meio da rede de drenagem.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (P_i - Q_{sup,i} - E_i - W_i - Q_{Sub,i}) \quad (1)$$

onde i é o passo de tempo utilizado na simulação; SW e SW_0 são os teores de umidade de água no solo no tempo i e no início do passo, respectivamente; P_i é a precipitação no dia i ; $Q_{sup,i}$ é o escoamento superficial no dia i ; E_i é a evapotranspiração no dia i ; W_i é a água entrando na zona vadosa do solo no dia i ; e $Q_{Sub,i}$ é o escoamento subterrâneo no dia i .

Neste estudo, o SWAT foi configurado para estimar o escoamento superficial a partir do método da Curva Número proposto pelo Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos (USDA-SCS, 1972), a evapotranspiração com a equação de Penman-Monteith (MONTEITH, 1965) e a propagação do escoamento no canal por meio do método dos reservatórios variáveis. Maiores descrições referentes ao equacionamento e implementação do projeto no SWAT são apresentadas em Arnold *et al.* (1998), Neitsch *et al.* (2009) e Srinivasan *et al.* (1998).

O modelo SWAT requer informações de tipos de solo, uso e ocupação do solo, e topográficas, no formato de mapas temáticos (FIGURA 2), e climáticas para performar a simulação da vazão. Os mapas com as classes de solo e o uso e ocupação do solo presentes na área de estudo foram obtidas da Empresa Brasileira de pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2011) e Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2015), respectivamente. As informações topográficas foram extraídas do Modelo Digital de Elevação (MDE) produzido a partir do *Advanced Spaceborn Thermal Emision and Reflection Radiometer* (ASTER) com resolução espacial de 30 m obtido do *United States Geological Survey* (USGS).

2.3 Dados Climáticos de Entrada Utilizados para Simulação Hidrológica

O SWAT requer informações diárias de precipitação, temperaturas máxima e mínima, radiação solar, umidade relativa e velocidade do vento. Os dados de precipitação do *Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA)* (HUFFMAN et al., 2007), versão 3B42V7, foram utilizados por apresentar melhores resultados na simulação hidrológica na área de estudo em comparação com outros produtos de precipitação (AMORIM et al., 2020). Lançado em 1997 pela *National Aeronautics and Space Administration (NASA)* em parceria com a *Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)*, o TMPA possui resolução espacial de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$, resolução temporal de três horas e cobertura entre as latitudes 50° N a 50° S. Os dados utilizados foram do período de 2000 a 2018.

Informações de temperaturas máxima e mínima, umidade relativa do ar e radiação solar foram obtidas do *Climatic Research Unit Gridded Time Series (CRU TS)* (HARRIS et al., 2020), versão 4.04, produzido pela Universidade East Anglia. O CRU TS é uma base de dados que fornece informações mensais de observações para todo o globo, exceto Antártica, desde 1901 com resolução espacial de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$. Uma vez que o SWAT requer entradas em passo de tempo diário, os valores médios mensais foram replicados para os dias em seus respectivos meses. Dados de velocidade do vento foram obtidos do CRU CL 2.0 (NEW et al., 2002) com resolução espacial de $10' \times 10'$. O mesmo procedimento adotado para CRU TS 4.04 foi utilizado para converter as informações mensais em diárias. Todos estes dados foram obtidos para o período de 1901 a 2010.

2.4 Calibração e Validação do SWAT

Neste estudo, os anos de 1998 e 1999 foram utilizados para aquecimento do modelo. O período de calibração e validação em passo mensal foram realizadas em 2000-2005 e 2006-2010, respectivamente. Estes períodos foram adotados com base na disponibilidade dos dados do TMPA e reanálises climáticas a serem avaliadas, uma vez que o TMPA se inicia em 1998 e 2010 é ano mais recente disponível para todas as reanálises. Para redução das incertezas relacionadas às condições iniciais de simulação, tais como umidade do solo e escoamento subterrâneo, os dois anos anteriores aos períodos de calibração (1998-1999) e validação (2004-2005) foram utilizados para aquecimento do modelo. A calibração foi realizada de forma automática utilizando o *Sequential Uncertainty Fitting Algorithm* versão 2 (SUFI-2) implementado no *SWAT Calibration and Uncertainty Program (SWAT-CUP)* (ABBASPOUR, 2012) em duas simulações de 500 iterações cada. O SUFI-2 tem sido aplicado

em diversos estudos no Brasil e no mundo (AMORIM et al., 2020; KOUCHI et al., 2017; PANG et al., 2020; SILVA et al., 2018).

O SUFI-2 parte de uma faixa inicial de valores dos parâmetros até que a faixa de 95% de predição de incerteza (95PPU) englobe o máximo possível dos dados observados da variável de saída e a distância entre os limites superiores e inferiores da 95PPU seja a menor possível (ABBASPOUR et al., 2004). No SWAT-CUP, o fator-p e o fator-r são utilizados para avaliar a incerteza da calibração utilizando o SUFI-2. O fator-p representa o percentual de dados observados envelopados pela 95PPU e o fator-r é a espessura média da 95PPU (ABBASPOUR, 2015). O nível de incerteza da calibração foi considerado aceitável quando os valores do fator-p e fator-r foram superiores a 0,7 e menor que 1,0, respectivamente, como sugerido por Abbaspour (2015). Os parâmetros e suas respectivas faixas iniciais de valores adotados neste estudo foram obtidos de estudos prévios no bioma Cerrado e na área de estudo (AMORIM et al., 2020; OLIVEIRA et al., 2019; RODRIGUES et al., 2019).

Os dados de vazões naturais para a usina hidrelétrica de Serra da Mesa obtidos do Sistema de Acompanhamento de Reservatórios (<https://www.ana.gov.br/sar/>) foram utilizadas como dados observados para calibrar o SWAT. Vazões naturalizadas são aquelas que ocorreriam em uma determinada seção do curso d'água sem a interferência antrópica (GUILHON et al., 2007). As vazões naturais são obtidas pelo somatório das vazões não regularizadas, evaporação líquida e as vazões correspondente aos usos consuntivos na bacia. O método utilizado para estimativa de cada componente da vazão natural está apresentado em ANA (2011). Assim, as vazões naturalizadas eliminam os efeitos do reservatório, evaporação do lago e retiradas de água descartando a necessidade da simulação do reservatório no projeto do SWAT. Dada a predominância da energia hidrelétrica na matriz energética brasileira, diversos estudos têm adotado a vazão naturalizada na simulação hidrológica no país (AMORIM et al., 2020; CASSALHO et al., 2020; MELLO et al., 2021; OLIVEIRA et al., 2017)

A validação do modelo foi realizada a partir de uma simulação de 500 iterações empregando a faixa final de valores do conjunto de parâmetros obtida após a segunda simulação da calibração. A incerteza foi avaliada utilizando o fator-p e fator-r e o mesmo critério adotado na calibração. O coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) (Equação 2) foi utilizado como função objetivo para otimizar a simulação e como critério de avaliação de desempenho do modelo. O NSE determina a magnitude relativa entre a variância do resíduo e a variância dos dados observados indicando o nível de ajuste do gráfico dos dados simulados versus os observados em comparação com a reta 1:1 (MORIASI et al., 2015). Além do NSE, o Percentual de Viés (PBIAS) (Equação 3) foi utilizado para avaliar o desempenho do SWAT na simulação

da vazão. O PBIAS indica a tendência média do modelo, ou seja, se os dados simulados estão sub ou superestimando os observados.

$$NSE = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{Q}_i)^2} \quad (2)$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (3)$$

A classificação do desempenho do SWAT foi realizada conforme o critério de Moriasi et al. (2015). A simulação foi classificada como “muito boa” quando $NSE > 0,80$ e $PBIAS < \pm 5\%$; “boa” onde $0,70 < NSE \leq 0,80$ e $\pm 5\% \leq PBIAS < \pm 10\%$; “satisfatória” quando $0,50 < NSE \leq 0,70$ e $\pm 10\% \leq PBIAS < \pm 15\%$; e “insatisfatória” quando $NSE \leq 0,50$ e $PBIAS \geq \pm 15\%$. Além dos critérios estatísticos, a análise gráfica da hidrógrafa foi utilizada na avaliação do desempenho do modelo uma vez que permite identificar tendências e quaisquer anomalias nos dados (DAGGUPATI et al., 2015).

2.5 Série de Dados de Reanálises Climáticas

Uma das reanálises utilizadas foi a versão mais recente produzida pela *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)*, *Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences (CIRES)* e *Department of Energy dos EUA (DOE)* dentro do projeto Reanálises do Século XX (20CR) denominado 20CRv3 (SLIVINSKI et al., 2019). Nesse projeto é utilizado um modelo atmosférico de quatro dimensões, que fornece estimativas climáticas globais a cada três horas em grids de $1,0^\circ \times 1,0^\circ$ para o período de 1836 a 2015 (COMPO et al., 2011). O modelo atmosférico utilizado é o NCEP *Global Forecast System (GFS)* versão 2017 que prescreve os dados de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) e concentração de gelo marinho (SIC) para criar as condições de contorno. Em seguida, observações históricas da pressão na superfície são assimiladas por meio de um *Kalman Filter* que utiliza uma análise tetra dimensional para atualizar as condições de contorno e produzir as análises de campo (SLIVINSKI et al., 2019).

O ERA-20CM foi utilizado para avaliar a capacidade do modelo de previsão do ECMWF na simulação do clima no século XX. O ERA-20CM foi o primeiro estudo dentro do projeto ERA-CLIM e envolve apenas a integração do modelo climático, isto é, não há assimilação de dados meteorológicos sinóticos, havendo a incorporação das informações de TSM e SIC obtidas do *Met Office Hadley Centre (HadISST2)* (TITCHNER; RAYNER, 2014)

nas condições de contorno junto com as forçantes do CMIP5 (HERSBACH et al., 2015). Assim, a partir dos dados do ERA-20CM é possível avaliar a incerteza do Sistema Integrado de Previsão (IFS) do ECMWF configurado apenas para simulação atmosférica. Os dados de precipitação provenientes do ERA-20CM são disponibilizados em um ensemble de 10 membros (a partir daqui denominados era0, era1..., era9), os quais abrangem o período de 1900 a 2010, a cada três horas e possuem resolução horizontal de $0,125^\circ \times 0,125^\circ$.

Por sua vez, o ERA-20C utiliza o mesmo modelo de previsão que ERA-20CM com algumas adaptações. Os dados de TSM e SIC no ERA-20C são obtidas de HadISST versão 2.1, as forçantes do CMIP5 e os dados de pressão na superfície e ventos marinhos dos *International Surface Pressure Databank* (ISPDv3.2.6) e *International Comprehensive Ocean Atmosphere Data Set* (ICOADSv2.5.1) são assimilados por meio de um sistema de análise variacional incremental em quatro dimensões (4D-VAR) (POLI et al., 2016). Diferentemente do ERA-20CM, os dados de precipitação são fornecidos em um único membro, uma vez que as estimativas de erros e desvio-padrão dos 10 membros do conjunto foram utilizadas como erros de fundo no 4D-VAR. Essas informações são utilizadas para refletir a dependência dos erros na dinâmica atmosférica e alterações na cobertura espacial dos dados ao longo do século XX (POLI et al., 2016). O ERA-20C abrange o período de 1900 a 2010, a cada três horas e possui resolução horizontal de $0,125^\circ$ graus \times $0,125^\circ$ graus. A utilização do ERA-20C permite avaliar o desempenho da assimilação de dados utilizando o 4D-VAR na estimativa da precipitação a partir das reanálises do ECMWF.

Os dados de precipitação subdiária provenientes de todas as reanálises foram acumulados para o passo diário, como requerido pelo SWAT. A fim de comparar com os dados pluviômetros da Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico (ANA), o acumulado foi realizado para o período de 24 horas iniciado todos os dias o mais próximo das 10 UTC, horário da medição da precipitação realizada pela ANA. Posteriormente, o método do escalonamento linear (TEUTSCHBEIN; SEIBERT, 2012) foi utilizado nos dados de precipitação das reanálises para a remoção de viés tendo adotados os dados da ANA como observados para o cálculo dos fatores de correção. Este método tem sido adotado em diversos estudos envolvendo modelagem hidrológica e dados de previsão climática (MELLO et al., 2021; OLIVEIRA et al., 2019, 2017; RODRIGUES et al., 2019). A aceitação entre os dados de pluviômetros locais e as reanálises climáticas após a correção de viés foi analisada pelo Coeficiente de correlação de Pearson (r) e a Raiz Quadrada do Erro Médio (RMSE) em bases diária e mensal.

2.6 Simulação Hidrológica com as Reanálises Climáticas

As simulações das vazões utilizando as reanálises climáticas foram realizadas substituindo os dados de precipitação do TMPA pelas respectivas séries de dados diários de precipitação das reanálises SWAT. Para isso, os valores dos parâmetros que produziram a “melhor simulação” durante a calibração, isto é, os valores que atingiram os melhores resultados estatísticos foram utilizados. O período de 1995-2010 foi utilizado para validar as reanálises climáticas quanto à simulação da vazão. A adoção deste período é justificada pelo fato de as vazões naturalizadas estarem disponíveis no portal da ONS a partir de 1995 e, uma vez que nem todas as reanálises possuem informações mais recentes que 2010, garantindo o mesmo período de validação para todas as séries de dados.

Os critérios adotados para avaliar o desempenho do modelo SWAT forçado com a precipitação proveniente das reanálises climáticas foram os mesmos utilizados para a calibração e validação do modelo utilizando o TMPA.

2.7 Identificação de Pontos de Mudanças nas Séries de Precipitação e Vazão ao Longo do Século XX

A identificação dos pontos de mudança nas séries hidro-meteorológicas é importante no processo de entender as alterações no comportamento hidrológico de determinada região (MUHAMMAD et al., 2020). As mudanças abruptas e as datas prováveis dessas ocorrências na série temporal de precipitação e vazão geradas a partir da reanálise climática com melhor desempenho foram identificadas por meio do teste de *Pettitt* (1979). Diversos estudos têm utilizado esse teste para identificar pontos de mudança em séries temporais (GERITANA et al., 2016; JAISWAL et al., 2015; MUHAMMAD et al., 2020).

Trata-se de um teste não paramétrico que subdivide a série em subséries baseado em alteração significativa da média. De acordo com *Pettitt* (1979), uma série de dados observados $S = x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ tem um ponto de mudança em t se as subséries $S_1 = x_1, x_2, \dots, x_t$ e $S_2 = x_{t+1}, x_{t+2}, \dots, x_n$ apresentarem uma função de distribuição comum $F_{S_1}(x)$ e $F_{S_2}(x)$, respectivamente, diferentes. O índice estatístico não paramétrico U_t para o método de *Pettitt* é descrito pelas Equações 4, 5 e 6. A estatística K e o nível de confiança (ρ) para uma série com n observações pelas Equações 5 e 6, respectivamente.

$$U_t = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^n \text{sign}(x_t - x_j) \quad 1 \leq t \quad (4)$$

$$\text{sign}(x_t - x_j) = \begin{cases} 1, & \text{se } (x_i - x_j) > 0 \\ 0, & \text{se } (x_i - x_j) = 0 \\ -1, & \text{se } (x_i - x_j) < 0 \end{cases}$$

$$K = \text{Max}|U_t| \quad (5)$$

$$\rho = \exp\left(\frac{-K}{n^2+n^3}\right) \quad (6)$$

A hipótese nula (H_0) é que não há mudanças na série. Uma vez que a probabilidade $p = 1 - \rho$ for maior que o nível de significância α , a hipótese nula é rejeitada. Neste trabalho foi adotado um nível de significância de 5%.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Calibração e Validação do SWAT

Os resultados das métricas estatísticas obtidas para a simulação da vazão utilizando o TMPA-CRU estão apresentados na Tabela 1. Tanto na calibração como na validação a vazão simulada apresentou baixos níveis de incertezas como pode ser observado a partir dos valores de fator-p e fator-r. De maneira geral, a 95PPU foi capaz de envelopar no mínimo 82% das vazões observadas e apresentou espessura adequada refletida pelo valor do fator-r próximo de 1. Desta forma, o modelo apresentou níveis de incertezas dentro do recomendado por Abbaspour (2015).

Considerando os valores obtidos no período de validação, ou seja, aquele que apresenta maiores incertezas, a simulação com os dados meteorológicos do CRU resultaram em incertezas próximas àquelas obtidas a partir de dados observacionais por Amorim *et al.* (2020). No referido estudo foi utilizada a precipitação por satélite TMPA e as demais variáveis meteorológicas provenientes de estações meteorológicas do INMET como dados de entrada no SWAT, tendo sido obtidos valores para o fator-p e fator-r de 0,88 e 0,84, respectivamente, para o período de 2002 a 2010. Tal aspecto destaca o desempenho adequado do CRU para a simulação hidrológica com o SWAT na SMA, viabilizando a sua utilização como dado de entrada ao longo do século XX.

Tabela 1 – Critérios estatísticos de avaliação de desempenho do SWAT obtidos para as etapas de calibração e validação utilizando dados do TMPA e CRU.

Etapa da simulação	Métricas estatísticas					
	Fator-p	Fator-r	R ²	NSE	PBIAS (%)	KGE
Calibração	0.92	0.85	0.9	0.89	-2.4	0,87
Validação	0.82	1.01	0.85	0.84	-4.1	0,83

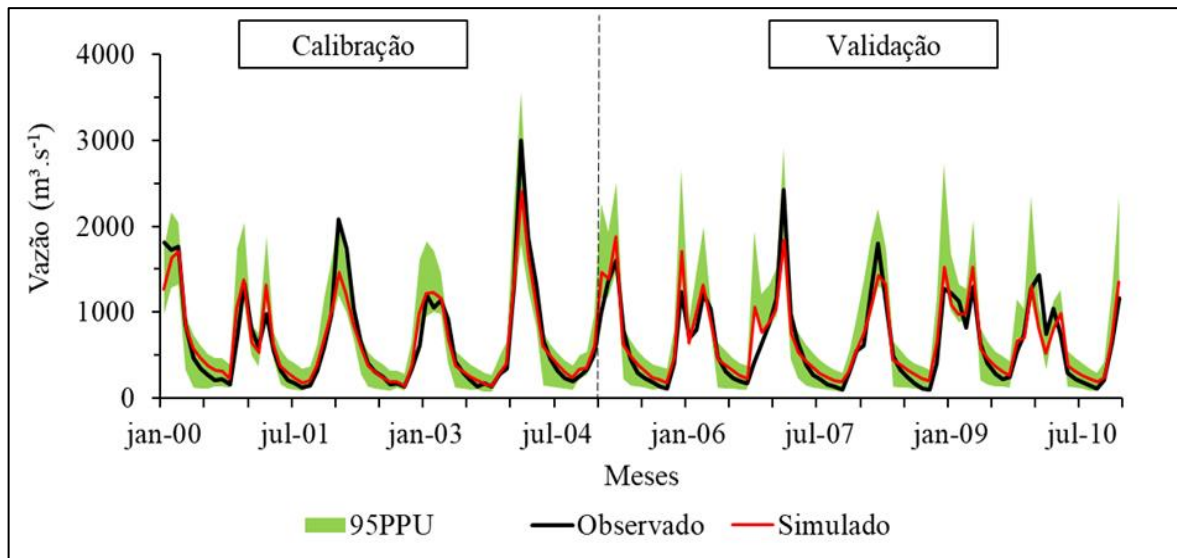
Fonte: Do Autor (2021).

O desempenho do modelo foi considerado “muito bom” para todos os critérios estatísticos adotados conforme recomendação de Moriasi *et al.* (2015). Valores de NSE indicaram que o modelo simula adequadamente a vazão mensal na SMA tanto no período chuvoso como de estiagem. Os valores negativos em ambas as etapas indicam que o modelo de forma geral superestima a vazão observada. Valores de KGE não possuem um critério ótimo definido, mas os resultados próximos a 1 (valor máximo possível) também ratificam o bom ajuste do modelo. Os resultados estatísticos estão próximos aos obtidos em outros estudos

realizados no bioma Cerrado utilizando o SWAT (AMORIM et al., 2020; OLIVEIRA et al., 2019; RODRIGUES et al., 2019).

Na Figura 3 foi possível observar o comportamento das vazões durante o período de simulação. Nota-se que as vazões observadas foram representadas adequadamente pelo modelo em ambas as etapas, entretanto foi possível observar subestimativas de alguns eventos de máximos, como no ano de 2002. Nesse ano o modelo subestimou a vazão observada em pouco mais de 29%, o que corresponde a um erro aproximado de $615 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. É importante destacar que a vazão máxima observada foi de $2997 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e ocorreu em fevereiro de 2004, no qual a subestimativa foi 10% menor do que a ocorrida em 2002. Em relação as vazões mínimas o modelo simulou adequadamente o período de recessão da SMA. Essas pequenas deficiências do SWAT forçado com TMPA também foi observada por Li *et al.* (2018) em estudo realizado como SWAT e TMPA na China. De maneira geral, o modelo calibrado pode ser utilizado para a gestão dos recursos hídricos para a SMA.

Figura 3 – Comportamento temporal da vazão observada, simulada e 95PPU para os períodos de calibração e validação do SWAT utilizando dados do TMPA e CRU.



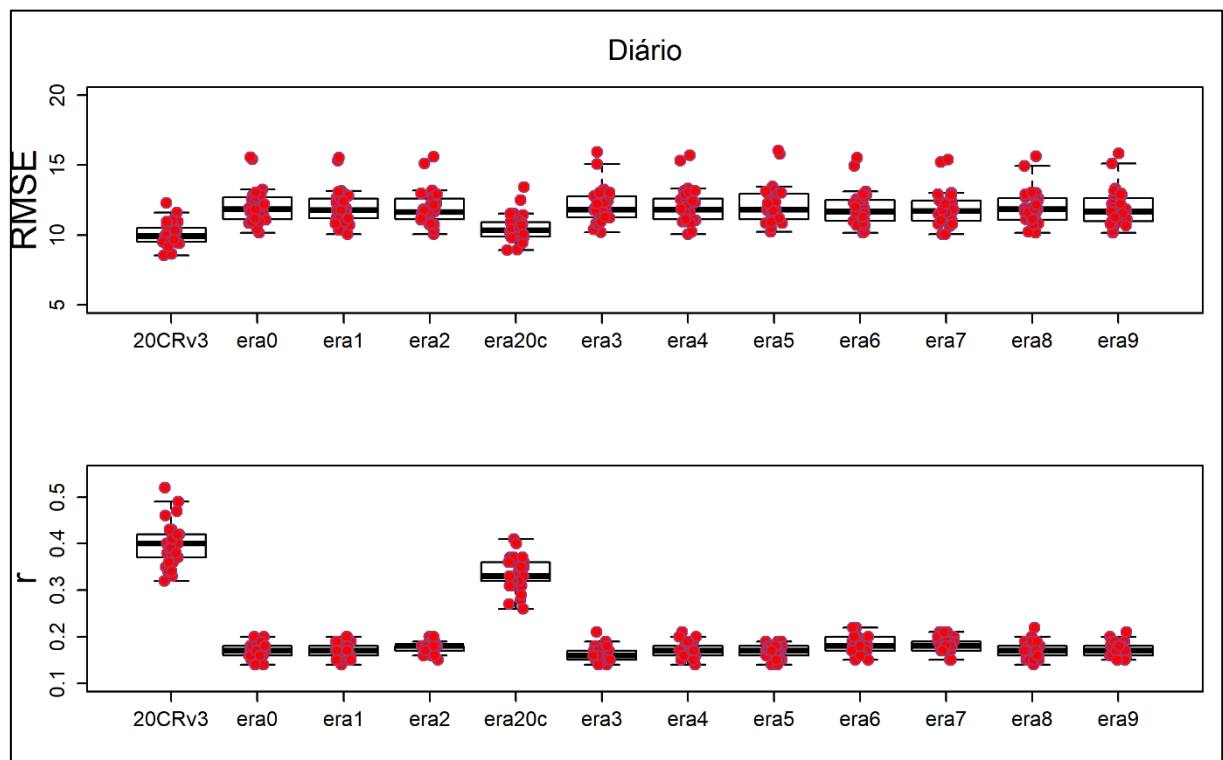
Fonte: Do Autor (2021).

3.2 Estimativas da Precipitação com Base nas Reanálises Climáticas

Os erros na estimativa da precipitação foram avaliados tanto em base diária como mensal por meio de comparação com os dados de precipitação da ANA e os resultados estão apresentados nas Figuras 4 e 5. Em escala diária os erros foram maiores, resultado esperado em virtude das incertezas envolvendo as simulações dos modelos. Em escala mensal, além da menor variabilidade intrínseca a esta escala, a correção de viés aplicada eliminou a presença de

erros sistemáticos que poderiam acarretar em enviesamento, e que afastariam os valores estimados aos observados nos postos pluviométricos. Tais erros podem ocorrer pela heterogeneidade da precipitação e complexidade do processo de reanálise climática. Hersbach *et al.* (2015) afirmaram que em regiões esparsamente monitoradas como o hemisfério sul, as reanálises não contêm informações de observações do comportamento atual da atmosfera e acabam resultando em dados enviesados do próprio modelo.

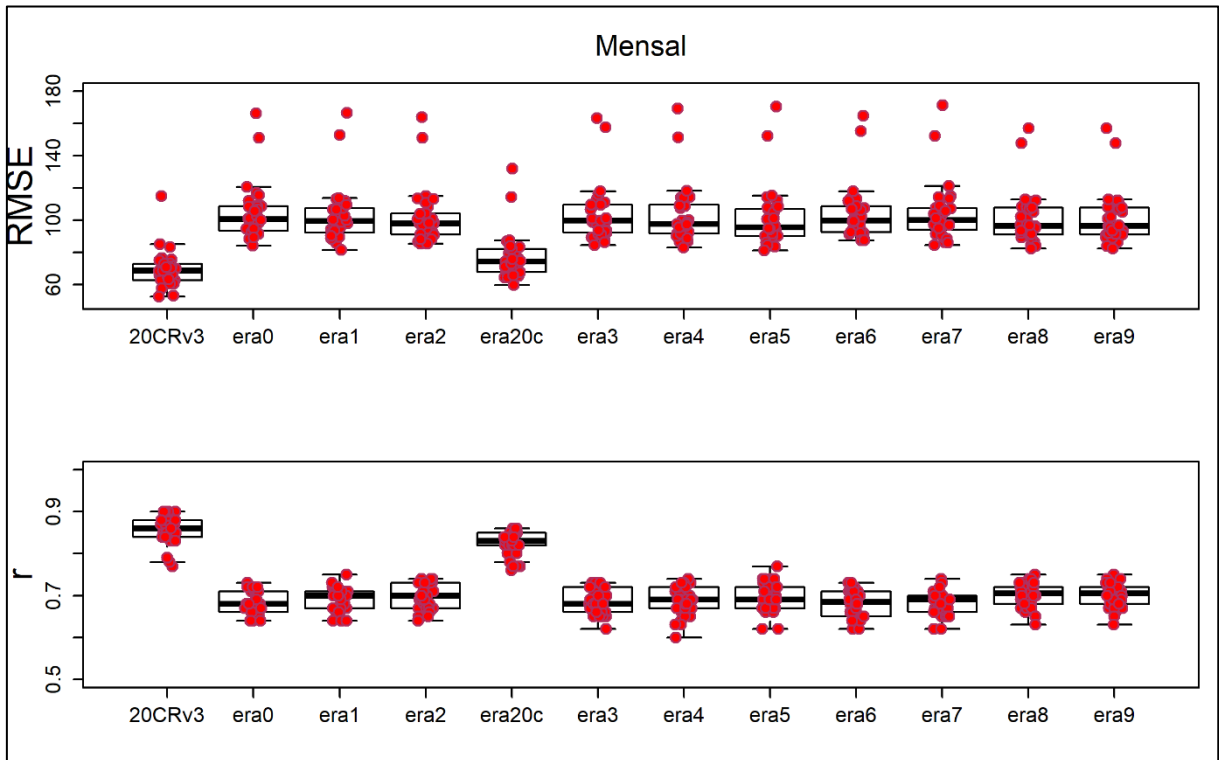
Figura 4 – Erros na estimativa da precipitação a partir das reanálises 20CRv3, ERA-20C e os membros do ERA-20CM (era0, era1, ..., era9) em escala diária. Os pontos vermelhos representam o resultado em cada posto pluviométrico.



Fonte: Do Autor (2021).

As estimativas provenientes dos membros do ERA-20CM apresentaram resultados inferiores àqueles obtidos pelo ERA-20C e 20CRv3 para r e RMSE nas duas escalas temporais. Os valores de r para os 10 membros do ERA-20CM foram superiores aos obtidos por Kim e Han (2019a) na Coreia do sul, onde os valores de r estiveram entre -0,171 e 0,228 em escala anual. Em escala mensal, o menor coeficiente de correlação foi 0,62 para o membro três. O melhor resultado comparado com Kim e Han (2019a) pode ser explicado pela correção de viés realizada pelos autores do estudo.

Figura 5 – RMSE e r para os dez membros do ERA-20CM (era0, era1, ... era9), ERA-20C e 20CRv3, em escala mensal.



Fonte: Do Autor (2021).

Os erros na estimativa da precipitação pelos diferentes membros do ERA-20CM foram próximos entre si (Figura 4 e 5). Apesar dos resultados menos adequados quando comparado com os demais produtos e considerando que não há assimilação de dados e a única variação são as condições iniciais, a baixa dispersão dos resultados dos membros do ERA-20CM indica que o modelo de previsão apresentou resultados promissores na reconstrução da precipitação na SMA, o que poderia ser melhorado com a utilização de uma técnica de assimilação de dados à saída do modelo. Quando o desempenho entre os dois produtos do ECMWF foi comparado, evidencia-se a importância da assimilação de dados na construção das reanálises climáticas. Como ambos os produtos são construídos com o mesmo modelo de previsão, a melhoria significativa nas estimativas do ERA-20C reflete as correções provenientes da aplicação do 4D-VAR. Melhores resultados do ERA-20C também foram obtidos por Kim e Han (2019b) quando comparado com o ERA-20CM na Coreia do Sul.

Em termos de valores médios mensais, os membros do ERA-20CM apresentaram RMSE próximo a 100 mm o que não permite afirmar que há diferença entre eles. As reanálises que assimilam dados observacionais tiveram valores de RMSE de 76,92 e 69,35 para o ERA-20C e 20CRv3, respectivamente. Assim como ocorreu para o coeficiente de correlação, o

20CRv3 apresentou-se como sendo a reanálise que mais adequadamente reproduziu a precipitação na SMA ao longo do século XX.

Slivinski *et al.* (2021) identificaram uma boa aceitação em escala regional do 20CRv3 quando comparado com bases de dados de precipitação ao longo do globo. Em estudo realizado na região central do Brasil, Prado *et al.* (2021) compararam a precipitação do 20CRv3 com o GPCC e obtiveram um fator de correlação de 0,78. No presente estudo, o valor médio do coeficiente de correlação para as estações utilizadas foi de 0,86.

3.3 Validação das Reanálises Climáticas Aplicadas à Simulação Hidrológica

Os resultados da validação da vazão simulada pelo modelo SWAT utilizando dados das reanálises climáticas e CRU para o período de 1995 a 2010 estão apresentados na Tabela 2. Individualmente, todos os membros do ERA-20CM apresentaram desempenho não satisfatório para todos os critérios de desempenho conforme Moriasi *et al.* (2015). Correa *et al.* (2017) avaliaram a capacidade do ERA-20CM para a simulação da vazão na bacia do rio Amazonas não obtivendo resultados satisfatórios com esta reanálise climática sem que uma assimilação de dados fosse aplicada. Com relação ao PBIAS, o ERA-20CM superestimou a vazão observada, com destaque para o membro dois, que alcançou valor de 48%.

Tabela 2 – Critérios estatísticos obtidos para os dez membros do ERA-20CM (era0, era1, ... era9), ERA-20C e 20CRv3 durante o período de validação.

Reanálise Climática	Critério Estatístico	
	NSE	PBIAS
NOAA 20CRv3	0,56	-8,1
ERA-20C	0,47	-16
era_0	-0,19	-39,6
era_1	-0,04	-31,8
era_2	-0,28	-47,9
era_3	-0,08	-25,8
era_4	-0,01	-37
era_5	-0,51	-27,3
era_6	0,06	-29,2
era_7	-0,12	-32,1
era_8	0,11	-31,8
era_9	0,12	-35,1

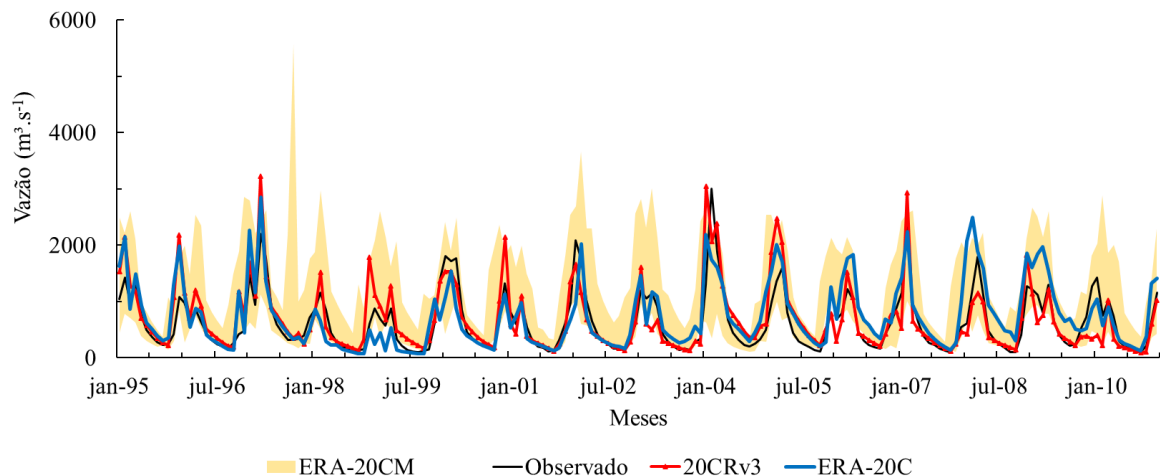
Fonte: Do Autor (2021).

Uma vez que o ensemble médio do ERA-20CM não foi capaz de representar adequadamente seus membros (KIM; HAN, 2019a), a faixa de valores simuladas pelos 10

membros foi adotada para analisar a simulação da vazão (Figura 6). De maneira geral, a faixa de vazões gerada pelos membros do ERA-20CM envolveu a vazão observada em grande parte do período analisado, indicando que de forma conjunta os membros captaram a sazonalidade da vazão em SMA. Contudo, observou-se um erro na estimativa da precipitação no período de estiagem no ano de 1997. Tal aspecto pode estar relacionado com o método de correção de viés aplicado, cuja correção é realizada por meio de fatores estimados a partir da proporção entre as precipitações médias mensais observadas e estimadas pelas reanálises. O período de estiagem na região é bem definido, e desta maneira, qualquer erro na estimativa da reanálise produzirá erros consideráveis quando multiplicado pelo fator de correção.

Utilizando-se cálculo semelhante ao adotado para o fator-p, é observado que as simulações provenientes dos membros do ERA-20CM conseguem envolver aproximadamente 73% das vazões observadas (fator-p* = 0,73). Assim, uma vez que o ERA-20CM não assimilou dados para produção da reanálise e o conjunto dos membros envolveram grande quantidade das vazões observadas conforme limiar estabelecido por Abbaspour (2015), o modelo de previsão utilizado pelo ECMWF estimou as vazões da SMA com níveis de incertezas satisfatórias

Figura 6 – Range de vazões simuladas a partir dos dez membros do ERA-20CM, ERA-20C, 20CRv3 e as vazões observadas no período de validação das reanálises.



Fonte: Do Autor.

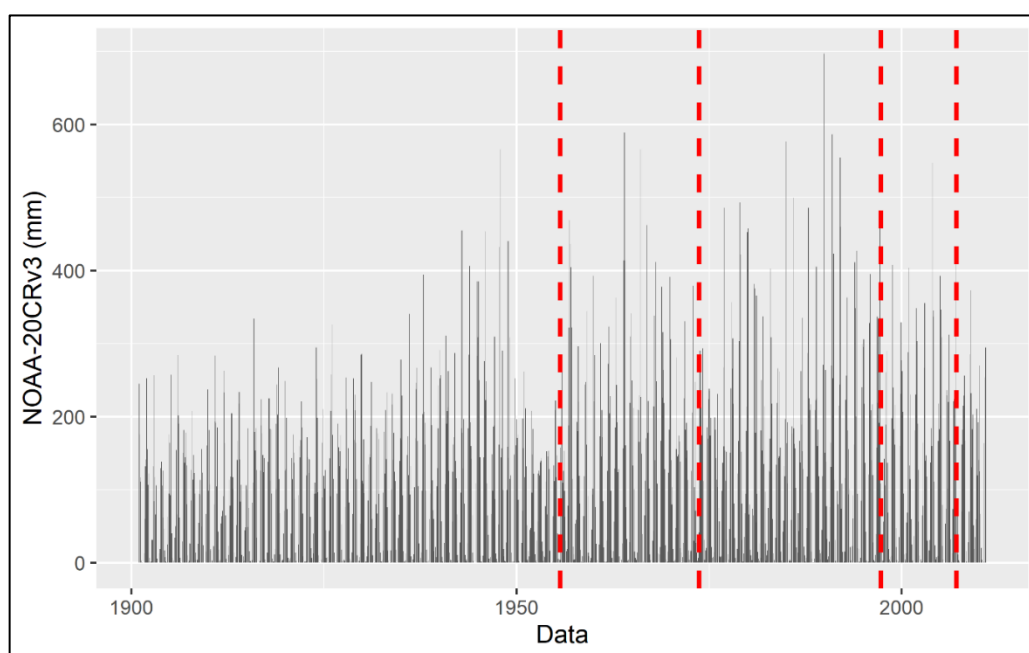
O 20CRv3 foi a única reanálise a apresentar desempenho “satisfatório” considerando o NSE (0,56) e superou o ERA-20C (0,47), classificado como “não satisfatório” conforme critério de Moriasi *et al.* (2015). Além disso, A reanálise do 20CRv3 também apresentou valores de PBIAS mais adequados, o que permitiu ter o desempenho classificado como “bom”. Ambas as reanálises resultaram em simulações que acompanham o comportamento temporal da vazão na SMA (Figura 6). A vazão simulada a partir do 20CRv3 representou mais adequadamente as

vazões de pico que a ERA-20C, como pode ser observado no período chuvoso no ano de 1999. Assaid *et al.* (2019) em estudo realizado na bacia hidrográfica do Tocantins – Araguaia obtiveram NSE superior a 0,7 e PBIAS variando de -4,7 a -24,7 para a simulação da vazão em escala mensal. No bioma Cerrado, Oliveira *et al.* (2019) também utilizando dados de pluviômetros para simular a vazão com o SWAT obtiveram NSE de 0,67 e 0,63, e PBIAS de -29 e 25,8%, respectivamente, na calibração e validação. A partir desses estudos, é possível observar que o 20CRv3 apresentou resultados compatíveis com aqueles utilizando dados de precipitação obtidos em campo. Desta maneira, a simulação da vazão ao longo do século XX foi reconstruída utilizando como dados de precipitação as informações provenientes do 20CRv3 pois apresentaram critérios estatístico satisfatórios e superior às demais (Tabela 2).

3.4 Reanálise Hidrológica do Século XX na SMA

Utilizando os dados do 20CRv3 foram obtidos dados de precipitação e vazões simuladas por meio do SWAT para o século XX. A partir do teste de *Pettitt* foram identificados quatro pontos de mudança na série histórica mensal de precipitação (Figura 7). A primeira mudança ocorreu em 1955 e indica que não houve alteração na média da precipitação na primeira metade do século XX. O segundo, terceiro e quarto pontos foram em 1973, 1997 e 2007, respectivamente. Embora no ano de 2007 tenha sido identificado uma mudança, ela foi descartada devido à quantidade de informações disponível na série a partir deste ano.

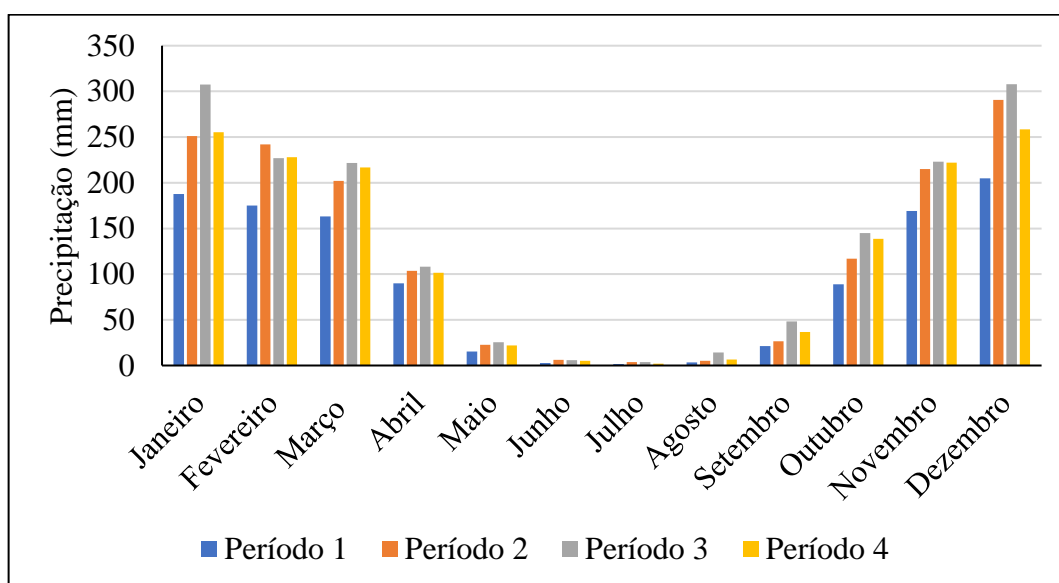
Figura 7 – Pontos de mudanças na série histórica mensal de precipitação (linhas vermelhas verticais) durante o século XX.



Fonte: Do Autor (2021).

A partir da Figura 8 nota-se que o primeiro período foi o que apresentou a menor precipitação média em toda a série temporal. Comparando as precipitações mensais dentre os períodos observa-se que a maior redução ocorreu no período chuvoso (dezembro, janeiro e fevereiro-DJF), o qual é responsável pela maior fração da precipitação anual na região. De acordo com os resultados da precipitação mensal obtida a partir do 20CRv3, os anos de 1952, 1953 e 1954 foram os que apresentaram os menores totais precipitados com 941 mm, 944 mm e 821 mm.

Figura 8 – Precipitação média mensal para cada período obtidos da análise de *Pettitt*.



Fonte: Do Autor (2021).

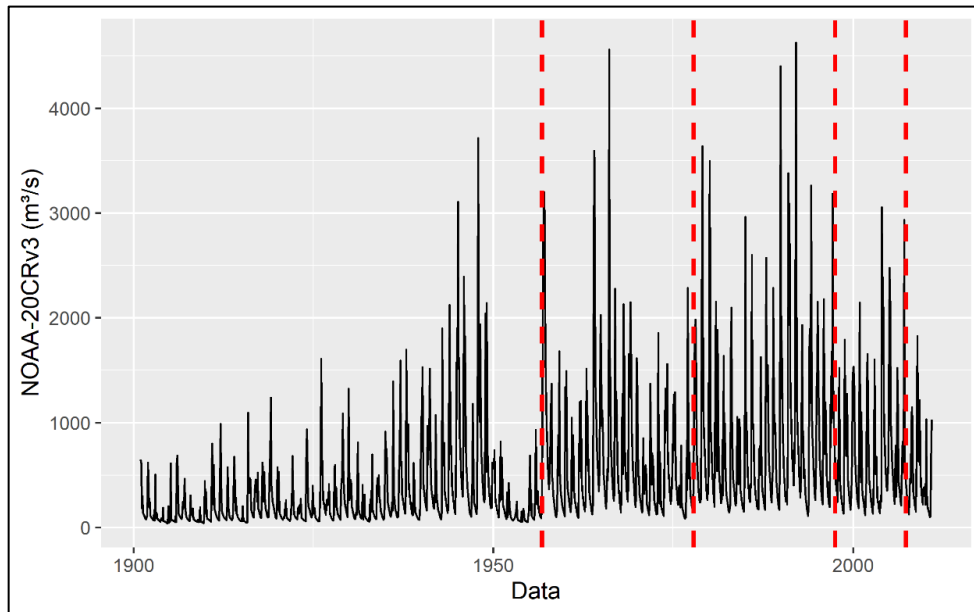
Para a década de 1950 é relatada ocorrência de secas em outras regiões do Brasil, como a identificada por Gozzo *et al.* (2019) para o estado de São Paulo e Silva *et al.* (2013) no estado da Bahia. Efeitos dessa seca podem ter afetado também a região de SMA o que explicaria a baixa pluviosidade neste período.

No ponto de mudança ocorrido na década de 70, Período 2, a precipitação média em DJF, de forma geral, foi maior que nos outros períodos (Figura 8). Alteração nos padrões de precipitação também foi identificado por outros autores na América do Sul (AGUDELO *et al.*, 2019; JACQUES-COPER; GARREAUD, 2015; PRADO *et al.*, 2021) e tem sido relacionado com a mudança na Oscilação Decadal do Pacífico da fase fria para quente. Prado *et al.* (2021) identificaram uma maior variabilidade da precipitação e aumento da ocorrência de eventos extremos após a década de 1970.

De maneira geral as alterações no comportamento da vazão acompanharam as mudanças ocorridas na série temporal de precipitação e mudanças abruptas foram identificadas nos anos

de 1956, 1977, 1997 e 2007 (Figura 9). As vazões médias anuais nos períodos 1, 2, 3 e 4 foram $301 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, $664 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, $839 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ e $637 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. Assim, como na precipitação, na década de 1950 foi o período com maior restrição hídrica na área de estudo, o que pode ser explicado pela propagação da seca meteorológica.

Figura 9- Pontos de mudanças na série temporal de vazão ao longo do século XX



Fonte: Do Autor (2021).

O terceiro período (1973-1997) apresentou as maiores vazões para a série temporal do século XX. Neste período ocorreram grandes cheias como no ano de 1989 e 1979 onde as vazões atingiram aproximadamente $3.188 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ e $3.137 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, respectivamente. Contudo, o evento de cheia ocorrido em 1983 na bacia do rio Tocantins e em outras regiões do Brasil (BODAS TERASSI et al., 2018; FLEISCHMANN et al., 2020) não foram representados pela simulação. Para evitar equívocos na vazão máxima foi utilizado como base o ano hidrológico para a região de estudo, o qual inicia-se em outubro e termina em setembro do ano seguinte.

No ano hidrológico 1982 – 1983 a vazão simulada foi $2.098 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ em fevereiro e a precipitação total em DJF foi 835 mm. Neste sentido, é necessário que as simulações com o 20CRv3 sejam validadas com dados observacionais para a avaliação de secas e cheias ao longo do século XX.

4 Considerações Finais

De maneira geral as reanálises climáticas apresentaram-se como uma alternativa aos dados de precipitação observacionais no desenvolvimento de estudos hidro-climáticos na SMA. A reanálise climática 20CRv3 foi a que melhor descreveu a estimativa tanto da precipitação como da vazão. O fato de não assimilar dados observados foi o principal responsável da ERA-20CM apresentar erros estatísticos superiores às demais reanálises na estimativa da precipitação nas escalas diária e mensal. Apesar de nenhum membro da ERA20-CM individualmente reproduzir adequadamente a vazão, a baixa variação de r e RMSE entre os membros indicaram que o modelo de previsão do ECMWF apresenta baixa incerteza e juntos conseguiram evolver 73% das vazões observadas.

A reanálise hidrológica para o século XX foi realizada utilizando os dados do 20CRv3, uma vez que foi a única reanálise que apresentou melhores coeficientes estatísticos na estimativa da precipitação mensal e coeficientes NSE e PBIAS satisfatórios para a vazão simulada a partir desta base de dados durante a validação (1995 a 2010). Quatro principais pontos de mudança foram identificados ao longo das séries de precipitação e vazão. A principal mudança ocorreu na década de 1970 onde houve redução acentuada da precipitação e vazão, principalmente durante o verão (DJF). A 20CRv3 não foi capaz de reproduzir um dos principais eventos de cheia que ocorreram na região, entretanto foi identificada a seca que ocorreu na década de 1950.

É importante destacar que algumas limitações afetaram o desenvolvimento da reanálise hidrológica. Uma das principais limitações consiste na representação das alterações do uso e ocupação do solo ao longo do século. Embora tenha sido simulado o crescimento da vegetação, a dinâmica da mudança da paisagem na área de estudo não foi representada. Essa limitação torna-se mais relevante devido à SMA estar localizada no bioma Cerrado, região que sofreu intensas alterações na paisagem em função da expansão agrícola a partir da década de 1970. Diante desta limitação, é recomendado estudos que avancem no desenvolvimento de modelos hidrológicos que permitam representar as alterações no uso e ocupação do solo durante o período estudado.

A segunda limitação pode ser atribuída à escala mensal dos dados meteorológicos utilizados para a estimativa da evapotranspiração. Embora na avaliação da vazão simulada para o cenário presente o modelo tenha sido capaz de captar o regime hidrológico da SMA apresentando desempenho “muito bom” e baixas incertezas, é recomendado estudos futuros que, caso haja disponibilidade de novas bases de dados, utilizem dados meteorológicos em

escala diária, o que tornaria a estimativa da evapotranspiração e do balanço hídrico mais detalhada.

A ausência de longas séries de dados observados de vazão e precipitação do início do século XX foi outra limitação para o desenvolvimento desse estudo. Os dados observados disponíveis, em sua grande maioria abrangiam apenas a segunda metade do século XX, o que dificultou a validação da vazão simulada e reanálises climáticas para esse período. Diante disso, recomenda-se estudos em regiões com disponibilidade de dados que permitam a validação das reanálises climáticas e das vazões simuladas também para a primeira metade do século XX, o que possibilitaria uma validação mais abrangente.

Apesar das limitações apresentadas, entende-se que os resultados obtidos neste capítulo representam uma primeira aproximação sobre o regime hidrológico do rio Tocantins no século XX que pode subsidiar o desenvolvimento de novas pesquisas que venham a utilizar reanálises climáticas em bacias hidrográficas brasileiras.

REFERÊNCIAS

- ABBASPOUR, Karim C. *et al.* A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. **Journal of Hydrology**, v. 524, p. 733–752, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.027>
- ABBASPOUR, Karim C. Calibration and Uncertainty Programs. **Science And Technology**, p. 106, 2012. Disponível em: http://swat.tamu.edu/media/114860/usermanual_swatcup.pdf
- ABBASPOUR, Karim C.; JOHNSON, C. A.; VAN GENUCHTEN, M. Th. Estimating Uncertain Flow and Transport Parameters Using a Sequential Uncertainty Fitting Procedure. **Vadose Zone Journal**, v. 3, n. 4, p. 1340–1352, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/vzj2004.1340>
- ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (Brasil). **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil: regiões hidrográficas brasileiras – Edição Especial**. 2015. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/regioeshidrograficas2014.pdf>
- ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (Brasil). **Qualificação de Dados Hidrológicos e Reconstituição de Vazões Naturais no País Resumo Executivo**. 2011. Disponível em: <https://arquivos.ana.gov.br/institucional/sge/CEDOC/Catalogo/2011/QualificacaoDadosHidrológicos.pdf>. Acesso em fevereiro/2022.
- ANEEL – Agência Nacional De Energia Elétrica Aneel (Brasil). **Sistema de Informações de Geração da ANEEL SIGA**. 2018. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNjc4OGYyYjQtYWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2IiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOiR9>.
- AGUDELO, Jhoana *et al.* Influence of longer dry seasons in the Southern Amazon on patterns of water vapor transport over northern South America and the Caribbean. **Climate Dynamics**, v. 52, n. 5–6, p. 2647–2665, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4285-1>
- ALFIERI, Lorenzo *et al.* A global streamflow reanalysis for 1980–2018. **Journal of Hydrology X**, v. 6, p. 100049, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.hydroa.2019.100049>
- ALVARES, Clayton Alcarde *et al.* Köppen’s climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- AMORIM, Jhones da Silva *et al.* Evaluation of Satellite Precipitation Products for Hydrological Modeling in the Brazilian Cerrado Biome. **Water**, v. 12, n. 9, p. 2571, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w12092571>
- ARNOLD, Jeffrey G. *et al.* 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. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>

BODAS TERASSI, Paulo Miguel de *et al.* Variabilidade do Índice de Precipitação Padronizada na Região Norte do Estado do Paraná Associada aos Eventos de El Niño-Oscilação Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, n. 1, p. 11–25, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0102-7786331002>

CASSALHO, Felício *et al.* Hydrologic Validation of MERGE Precipitation Products over Anthropogenic Watersheds. **Water**, v. 12, n. 5, p. 1268, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w12051268>

COMPO, Gilbert P. *et al.* The Twentieth Century Reanalysis Project. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 137, n. 654, p. 1–28, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/qj.776>

CORREA, Sly Wongchuig *et al.* Hydrological reanalysis across the 20th century: A case study of the Amazon Basin. **Journal of Hydrology**, v. 570, n. November 2018, p. 755–773, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.01.025>

CORREA, Sly Wongchuig *et al.* Multi-decadal Hydrological Retrospective: Case study of Amazon floods and droughts. **Journal of Hydrology**, v. 549, p. 667–684, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.04.019>

DAGGUPATI, P. *et al.* A Recommended Calibration and Validation Strategy for Hydrologic and Water Quality Models. **Transactions of the ASABE**, v. 58, n. 6, p. 1705–1719, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.13031/trans.58.10712>

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Mapa de solos do Brasil**. 2011. Disponível em: <http://mapoteca.cnps.embrapa.br/projetos.aspx>. Acesso em: 14 dez. 2019.

FALCK, Aline S. *et al.* Propagation of satellite precipitation uncertainties through a distributed hydrologic model: A case study in the Tocantins–Araguaia basin in Brazil. **Journal of Hydrology**, v. 527, p. 943–957, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.05.042>

FLEISCHMANN, Ayan Santos *et al.* **The great 1983 floods in South American large rivers: a continental hydrological modelling approach**. [S. l.]: Taylor & Francis, 2020. ISSN 21503435. v. 65 Disponível em: <https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1747622>

FUJIWARA, Masatomo *et al.* Introduction to the SPARC Reanalysis Intercomparison Project (S-RIP) and overview of the reanalysis systems. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 17, n. 2, p. 1417–1452, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/acp-17-1417-2017>

GETIRANA, Augusto. Extreme water deficit in Brazil detected from space. **Journal of Hydrometeorology**, v. 17, n. 2, p. 591–599, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1175/JHM-D-15-0096.1>

GOZZO, Luiz F. *et al.* Climatology and trend of severe drought events in the state of Sao Paulo, Brazil, during the 20th century. **Atmosphere**, v. 10, n. 4, p. 1–16, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ATMOS10040190>

GUILHON, Luiz Guilherme Ferreira; ROCHA, Vinicius Forain; MOREIRA, Jonatas Costa. Comparação de Métodos de Previsão de Vazões Naturais Afluentes a Aproveitamentos Hidroelétricos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, p. 13–20, 2007.

HARRIS, Ian *et al.* Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. **Scientific Data**, v. 7, n. 1, p. 1–18, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3>

HERSBACH, Hans *et al.* ERA-20CM: A twentieth-century atmospheric model ensemble. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 141, n. 691, p. 2350–2375, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/qj.2528>

HUFFMAN, George J. *et al.* Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG) Technical Documentation. **Journal of ISMAC**, v. 01, n. 02, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.36548/jismac.2019.2>

HUFFMAN, George J. *et al.* The TRMM Multi-Satellite Precipitation Analysis (TMPA). *In: SATELLITE RAINFALL APPLICATIONS FOR SURFACE HYDROLOGY*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2010. p. 3–22. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-90-481-2915-7_1

HUFFMAN, George J. *et al.* The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-Global, Multiyear, Combined-Sensor Precipitation Estimates at Fine Scales. **Journal of Hydrometeorology**, v. 8, n. 1, p. 38–55, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1175/JHM560.1>

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Mudanças na cobertura e uso da terra 2000 - 2010 -2012**. 2015. Disponível em: http://maps.lapig.iesa.ufg.br/?layers=pa_br_uso_solo_500_ibge.

JACQUES-COPER, Martín; GARREAUD, René D. Characterization of the 1970s climate shift in South America. **International Journal of Climatology**, v. 35, n. 8, p. 2164–2179, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/joc.4120>

JAISWAL, R. K.; LOHANI, A. K.; TIWARI, H. L. Statistical Analysis for Change Detection and Trend Assessment in Climatological Parameters. **Environmental Processes**, v. 2, n. 4, p. 729–749, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40710-015-0105-3>

JUNQUEIRA, Rubens *et al.* Drought severity indexes for the Tocantins River Basin, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 141, n. 1–2, p. 465–481, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03229-w>

KIM, Dong-Ik; HAN, Dawei. Comparative study on long term climate data sources over South Korea. **Journal of Water and Climate Change**, v. 10, n. 3, p. 504–523, 2019a. Disponível em: <https://doi.org/10.2166/wcc.2018.032>

KIM, Dong-Ik; HAN, Dawei. Evaluation of ERA-20cm reanalysis dataset over South Korea. **Journal of Hydro-environment Research**, v. 23, p. 10–24, 2019b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jher.2019.01.004>

KOUCHI, Delaram Houshmand *et al.* Sensitivity of calibrated parameters and water resource estimates on different objective functions and optimization algorithms. **Water (Switzerland)**,

v. 9, n. 6, p. 1–16, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w9060384>

LALOYLAUX, Patrick *et al.* CERA-20C: A Coupled Reanalysis of the Twentieth Century. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, v. 10, n. 5, p. 1172–1195, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2018MS001273>

MELLO, Carlos R *et al.* Climate Change Impacts on Water Resources of the Largest Hydropower Plant Reservoir in Southeast Brazil. **Water**, v. 13, n. 11, p. 1560, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w13111560>

MELO, Davi de C. D. *et al.* Performance evaluation of rainfall estimates by TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis 3B42V6 and V7 over Brazil. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 120, n. 18, p. 9426–9436, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/2015JD023797>

MONTEIRO, José A. F. *et al.* Accuracy of grid precipitation data for Brazil: application in river discharge modelling of the Tocantins catchment. **Hydrological Processes**, v. 30, n. 9, p. 1419–1430, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/hyp.10708>

MONTEITH, J. L. Evaporation and environment. **Symposia of the Society for Experimental Biology**, n. 19, p. 205–234, 1965.

MORIASI, Daniel N. *et al.* Hydrologic and Water Quality Models: Performance Measures and Evaluation Criteria. **Transactions of the ASABE**, v. 58, n. 6, p. 1763–1785, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.13031/trans.58.10715>

MUHAMMAD, Waseem *et al.* Hydrological drought indexing approach in response to climate and anthropogenic activities. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 141, n. 3–4, p. 1401–1413, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03227-y>

MYERS, Norman *et al.* Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, v. 403, n. 6772, p. 853, 2000. Disponível em: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/21564574.1998.9650003>

NEITSCH, S. L. *et al.* Soil & water assessment tool theoretical documentation, version 2009, Grassland, soil and water research laboratory-agricultural research service. **Blackland Research Center-Texas AgriLife Research**, 2009.

NEW, Mark *et al.* A high-resolution data set of surface climate over global land areas. **Climate Research**, v. 21, n. 1, p. 1–25, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.3354/cr021001>

NOBREGA, R. L. B. *et al.* Identifying hydrological responses of micro-catchments under contrasting land use in the Brazilian Cerrado. **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, v. 12, n. 9, p. 9915–9975, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/hessd-12-9915-2015>

OLIVEIRA, Paulo Tarso s *et al.* The water balance components of undisturbed tropical woodlands in the Brazilian cerrado. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 19, n. 6, p. 2899–2910, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/hess-19-2899-2015>

OLIVEIRA, Vinícius Augusto *et al.* Modeling the effects of climate change on hydrology and

sediment load in a headwater basin in the Brazilian Cerrado biome. **Ecological Engineering**, v. 133, n. April, p. 20–31, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.04.021>

OLIVEIRA, Vinicius augusto *et al.* Assessment of climate change impacts on streamflow and hydropower potential in the headwater region of the Grande river basin, Southeastern Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 15, p. 5005–5023, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/joc.5138>

GASSMAN, P. W. *et al.* The Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, Applications, and Future Research Directions. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 4, p. 1211–1250, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.13031/2013.23637>

PANG, Jianzhuang *et al.* Hydrological evaluation of open-access precipitation data using SWAT at multiple temporal and spatial scales. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 24, n. 7, p. 3603–3626, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/hess-24-3603-2020>

PETTITT. A Non-parametric to the Approach Problem. **Applied Statistics**, v. 28, n. 2, p. 126–135, 1979.

POLI, Paul *et al.* ERA-20C: An atmospheric reanalysis of the twentieth century. **Journal of Climate**, v. 29, n. 11, p. 4083–4097, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0556.1>

PRADO, Luciana Figueiredo *et al.* Changes in summer precipitation variability in central Brazil over the past eight decades. **International Journal of Climatology**, v. 41, n. 8, p. 4171–4186, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/joc.7065>

RODRIGUES, Jéssica Assaid Martins *et al.* Climate change impacts under representative concentration pathway scenarios on streamflow and droughts of basins in the Brazilian Cerrado biome. **International Journal of Climatology**, n. January, p. 1–16, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/joc.6347>

SILVA, Richarde Marques da *et al.* 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. Disponível em: <https://doi.org/10.2166/nh.2018.222>

SILVA, Jeferson Pereira Martins *et al.* Computational techniques applied to volume and biomass estimation of trees in Brazilian savanna. **Journal of Environmental Management**, v. 249, n. February, p. 109368, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109368>

SLIVINSKI, L. C. *et al.* An evaluation of the performance of the twentieth century reanalysis version 3. **Journal of Climate**, v. 34, n. 4, p. 1417–1438, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0505.1>

SLIVINSKI, Laura C. *et al.* Towards a more reliable historical reanalysis: Improvements for version 3 of the Twentieth Century Reanalysis system. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 145, n. 724, p. 2876–2908, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/qj.3598>

SRINIVASAN, R. *et al.* LARGE AREA HYDROLOGIC MODELING AND ASSESSMENT

PART II: MODEL APPLICATION. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 34, n. 1, p. 91–101, 1998. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05962.x>

TEUTSCHBEIN, Claudia; SEIBERT, Jan. Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. **Journal of Hydrology**, v. 456–457, p. 12–29, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.05.052>

THIENGO, Silvana C.; SANTOS, Sonia B.; FERNANDEZ, Monica A. Malacofauna límnic da área de influência do lago da usina hidrelétrica de Serra da Mesa, Goiás, Brasil.: I. Estudo qualitativo. **Revista Brasileira de Zoologia**, v. 22, n. 4, p. 867–874, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0101-81752005000400010>

TITCHNER, Holly A.; RAYNER, Nick A. The Met Office Hadley Centre sea ice and sea surface temperature data set, version 2: 1. Sea ice concentrations. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 119, n. 6, p. 2864–2889, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/2013JD020316>

USDA, SCS. United States Department of Agriculture, Soil Conservation Service. **National Engineering Handbook**. Hydrology Section, v. 4, p. 4-10, 1972.

**ARTIGO 3 – MODELING THE IMPACT OF PROJECTED CLIMATE CHANGE
ON HYDROLOGY IN A DATA-SCARCE WATERSHED LOCATED IN THE
BRAZILIAN TROPICAL SAVANNA**

Jhones da Silva Amorim^{1*}, Marcelo Ribeiro Viola¹, Rubens Junqueira¹, Carlos Rogério de Mello¹, Nicole Lopes Bento², and Junior Cesar Avanzi³

¹ Hydraulics Laboratory, Department of Water Resources, Engineering School, Federal University of Lavras

² Department of Engineering, Engineering School, Federal University of Lavras

³ Department of Soil Sciences, College of Agriculture Science of Lavras, Federal University of Lavras

Artigo submetido ao periódico “Hydrological Processes” – ISSN: 0885-6087, sendo apresentado segundo normas de publicação do mesmo.

ABSTRACT

Tropical savannas are one of the most affected biomes worldwide by anthropogenic activities. The Cerrado biome, also referred to as the Brazilian tropical Savanna, is one of the world's environmental hotspots due to its high biodiversity and endemism. Also, it is essential for water resources in South America and hydropower generation in Brazil. The reduction on precipitation caused by climate change has reduced the water availability and sustainable development of the Cerrado biome. Nevertheless, the scarce weather monitoring network in the Cerrado biome has been a challenge for studies of the climate change impacts on water resources. In this context, this study aimed to evaluate the capacity of an interpolated weather observed database (IOD) for the hydrological simulation and the impacts of climate change throughout the 21st century under different emissions scenarios on the streamflow in a basin in the Cerrado biome. SWAT model was calibrated and validated in a watershed encompassing 51,237 km². The regional climate models (RCMs) Eta/HadGEM2-ES and Eta/MIROC5 under the representative concentration pathways (RCPs) 4.5 and 8.5 were used to simulate the streamflow changes in three time slices (2010–2040, 2041–2070, and 2071–2099). In general, the statistical coefficients indicated that IOD resulted in an adequate streamflow simulation with low levels of uncertainty. At least 85% of the data were enveloped by 95PPU, whose r-factor did not exceed 1.18. SWAT model forced with IOD presented an overestimation of the minimum streamflows, whereas the highest streamflows were better represented. In the context of climate change impacts, streamflows can be reduced by up to 70% for 2099, being Eta/HadGEM2-ES RCM under RCP8.5 projected the most severe impact. On average, the most significant runoff reductions occurred in the first and third time slice (-54.51%).

Keywords: Hydrological Modeling, Interpolated Weather Data, Regional Climate Model, Climate Change

1. INTRODUCTION

The Brazilian tropical Savanna, also referred to as the Cerrado biome, is the second richest Brazilian biome and is one of the most threatened by human economic activities (Sano et al., 2010). The Cerrado biome is one of the world's environmental hotspots because it has high biodiversity and endemism (Myers et al., 2000). Besides, this biome is essential for water resources as it encompasses the headwaters of relevant South American river basins, including the upper course of significant tributaries of the Amazon, such as the Xingu and Tapajós, and the Paranaíba River, which is one of the most important tributaries of the Paraná River basin. Furthermore, a significant portion of one of the world's largest aquifer systems and the largest groundwater reservoir in South America, the Guarani aquifer, is located in the Cerrado (Machado et al., 2016). In addition, the Cerrado biome is crucial for hydropower generation in Brazil as some of the largest Brazilian hydropower plants are on rivers of the Cerrado biome (Oliveira et al., 2015). Approximately 291 small hydropower plants are working in Cerrado, and there are 829 new plants planned (Latrubesse et al., 2019).

Although Cerrado biome's importance, approximately half of two million km² of its original area was converted into pastures and croplands due to agricultural expansion in the last 55 years (Latrubesse et al., 2019), and the increase in water demand has intensified conflicts by water use (Ferreira et al., 2020).

Climate change caused by human activities has become an increasing concern and a significant challenge worldwide (Oliveira et al., 2019). According to the Six Assessment Report (AR6) of the Intergovernmental Panel on Climate Change, climate change is intensifying the water cycle, which brings more intense rainfall and associated flooding, as well as more intense droughts (Cordeiro et al., 2021). The General Circulation Models (GCMs) and Regional Climate Models (RCMs) are the alternatives to understand future climate changes and characterize results and uncertainties (IPCC, 2013). Previous studies using GCM/RCM scenarios for the 21st century in the Cerrado biome have shown that precipitation would reduce due to possible climate change (Oliveira et al., 2019; Rodrigues et al., 2019).

The impacts from future climate changes on hydrology may be evaluated using hydrological models adequately calibrated forced with GCM/RCM outputs. This approach has also been performed worldwide and, although these studies have uncertainties, they can still provide insights regarding water resources management and guide the adaptation studies.

Hydrological models must be calibrated and validated before being forced with GCM/RCM. This procedure is necessary to guarantee an adequate representation of the hydrological processes in the watershed. One of the most critical concerns is the weather inputs representing spatially the study site, which is required to configure an adequate calibration of the model. However, the sparse weather stations in the Cerrado biome result in a poorly spatial representation of the climate and, thus, the hydrology simulation (Amorim et al., 2020). Although satellite precipitation has emerged as an alternative, its performance is worse than ground-based interpolation products in some places in the world (Zhang et al., 2020). Therefore, the interpolation of the precipitation obtained in the site is an alternative to derive spatially distributed precipitation (Camera et al., 2014; Huang et al., 2019). Nevertheless, studies are required to verify the applicability of interpolated ground-based precipitations for hydrological simulation in the Cerrado biome.

Interpolated Observed Dataset (IOD) developed by Xavier et al. (2016) has been applied in several studies in Brazil. Souza et al. (2020) developed a hydrological simulation in the Atlantic Forest with IOD for filling gaps in the precipitation time series and solving the low spatial resolution of the rain gauges. Avila-Diaz et al. (2020) used IOD as a reference for assessing trends of climate extremes across Brazil employing reanalysis climates. Using remote sensing data and IOD, Melo et al. (2015) studied the links between meteorological and hydrological droughts in the Paraná River basin. Although several Brazil studies have used the IOD, this database has been little explored for streamflow simulation studies in the Cerrado biome.

In this context, this study aimed to assess possible changes in water availability in the Cerrado biome under different emissions scenarios due to climate change throughout the 21st century. For this purpose, the specific objectives were to i) calibrate and validate the hydrological model Soil and Water Assessment Tool (SWAT) using an interpolated observed dataset (IOD) available to Brazil; ii) investigate the simulation of groundwater and evapotranspiration for water resources management in the Cerrado biome; and iii) evaluate the hydrological impacts of the climate change using the hydrology model was driven by the downscaling of the HadGEM2-ES and MIROC5 GCM associated with RCP4.5 and RCP8.5 scenarios.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 Study Area

This study was carried out in the upstream area of the Serra da Mesa hydropower plant reservoir in the Tocantins-Araguaia River basin (TARB) (Figure 1), which has approximately 60% of the runoff coming from the Cerrado (Rodrigues et al., 2019). The Serra da Mesa upstream area (SM-TARB) drains 51,238 km² and is formed by the Tocantins River on the Minaçu plateau, Northern Goiás. Serra da Mesa reservoir has a surface area of 1,784 km², and its total storage capacity is 54.4 billion cubic meters, making it the largest artificial lake in Brazil in water storage (Alcântara et al., 2013).

[Insert Figure 1]

Serra da Mesa hydropower plant plays an essential role in the hydropower generation of the TARB, with an installed power of 1,275 MW (10% of the total power installed in the TARB). Its water level decreased nine meters in 2001, causing an energy shortage (Mocenni et al., 2008). After a long drought, Serra da Mesa hydropower plant reached the lowest level in November/2017 (5.92% of its total capacity) since its operation in 1998 (Junqueira et al., 2020).

The elevation of SM-TARB varies from 405 m to 1,673 m. According to Köppen type-climate classification, the region's climate is predominantly Tropical Savanna (Aw) with dry winter and minimum annual temperature above 18 °C (Alvares et al., 2013). According to observed data, the average annual precipitation is approximately 1,400 mm, and almost 90% of it occurs from October to April.

2.2 Hydrological Model

The Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model was selected because it is open-source, provides a GIS interface, and has been used satisfactorily in several studies. SWAT is a hydrological model developed by the United States Department of Agriculture (USDA) and Agricultural Research Service (ARS) in the 1980s to predict runoff, sediment transport, and water quality using different land use and management practices schemes. SWAT is a semi-distributed and physically-based model that performs simulations at a daily time step, allowing for continuous-time hydrological simulations (Arnold et al., 1998).

The streamflow simulation with the SWAT is based on a water balance approach (Equation 1) computed for each Hydrologic Response Unit (HRU), *i.e.*, areas comprising unique soil type, land use, topography, and management. Subsequently, SWAT accumulates the values obtained for each HRU to subbasins connected by the drainage network until the watershed's output.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day,i} - Q_{surf,i} - E_{a,i} - W_{seep,i} - Q_{gw,i}) \quad (1)$$

in which: SW_t is the final soil water content (mm H₂O), SW_0 is the initial soil water content on the day i (mm); t is the time (days); $R_{day,i}$ is the amount of precipitation on the day i (mm), $Q_{surf,i}$ is the amount of surface runoff on the day i (mm); $E_{a,i}$ is the amount of evapotranspiration on the day i (mm); $W_{seep,i}$ is the amount of water entering the vadose zone from the soil profile on the day i (mm); and $Q_{gw,i}$ is the amount of return flow on the day i (mm).

SWAT requires topography, land use, soil type, and weather data as inputs to predict streamflow. The input data is described in section 3.3. For this study, the ArcSWAT version 2012 rev.670 was used for streamflow simulations. The water balance components were estimated by: Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) method (USDA-SCS, 1972) in a daily database to estimate surface runoff; the Penman-Monteith method (Monteith, 1965) for calculating the potential evapotranspiration; and the Variable storage coefficient method for routing streamflow throughout the channel.

2.3 Model Inputs

2.3.1 Geospatial Data

SWAT employs the digital elevation model (DEM) to delineate the watershed's area, obtain topographical characteristics of the sub-watersheds, and create the stream network. The DEM was obtained from the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER), with a spatial resolution of 30 m, downloaded from the USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov/>).

The SM-TARB land use at a 1:500,000 scale was obtained from the Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE, 2015). Cerrado vegetation is the predominant land use in SM-TARB (67.13% of the area), followed by pasture and agriculture, with 22.17% and

4.56%, respectively. Water bodies and forests represent 3.38% and 2.22% of the land use, while urbanization and eucalyptus count 0.54% of the study area.

The soil map used in this study has a scale of 1:5,000,000 and was derived from the Brazilian Agricultural Research Corporation (EMBRAPA, 2011). Latosol, with 46.15%, is the dominant soil type in SM-TARB, of which 31.02% is Red Latosol (LV), and 15.13%, Red-Yellow Latosol (LVA). The other soils are Litholic Neosol (RL) 18.92%, Haplic Cambisol (CX, 13.84%), Argiluvic Chernosol (MT, 6.91%), Red-Yellow Argisol (PVA, 5.85%), Red Argisol (PV, 5.62%), and Red Nitisol (NV, 2.71%).

2.3.2 Hydrometeorological Dataset

The weather datasets used to calibrate the SWAT were obtained from the Interpolated Observed Dataset (IOD) developed by Xavier et al. (2016). IOD is freely available and it covers the Brazilian region in a daily grid data set in a high spatial resolution of $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ (~28 km x 28 km). The IOD is based on an interpolation of daily weather variables (precipitation, maximum and minimum temperatures, wind speed, solar radiation, and relative humidity) from 3,625 pluviometers and 735 meteorological stations from 1980 to 2013, and a cross-validation approach used to select the best interpolation schemes for each climate variable to create the grids.

IOD provides the weather variables required by SWAT are exactly those provided by IOD. Thus, daily data between 1995 and 2013 were downloaded from <https://utexas.app.box.com/v/Xavier-et-al-IJOC-DATA> and used as inputs to the SWAT model. This period was chosen to accept the streamflow time series available for the Serra da Mesa hydropower plant. The IOD grid is shown in Figure 1.

The naturalized streamflow was used to calibrate and validate SWAT. Naturalized streamflow was obtained from the National Electricity System Operator (ONS) for the period ranging from January 1995 –the beginning of streamflow records in the study area–, to December 2013, following the same period of IOD. Naturalized streamflows would occur in a basin without the reservoir or any anthropogenic activity (Guilhon et al., 2007). The naturalized streamflows are obtained by the sum of the unregulated streamflows, net evaporation in reservoir and the streamflows corresponding to the consumptive uses in the basin. The method used to estimate each component of the natural flow is presented in ANA (2011). Naturalized streamflows have been used in several hydrological modeling studies in Brazil,

such as those by Nóbrega et al. (2011), Jiménez et al. (2019), Amorim et al. (2020), Cassalho et al. (2020), and Mello et al. (2021).

2.4 Calibration, Validation, and Model Performance Evaluation

The SWAT model forced with IOD was calibrated and validated on daily and monthly time scales to evaluate the water availability and, subsequently, the climate change impacts on runoff in SM-TARB. The simulation was carried out for the period from January 1995 to December 2013. The first three years were used to warm up, which is essential in reducing the uncertainties regarding the surface domain for the initial conditions of the simulation (Viola et al., 2015; Triana et al., 2019).

The calibration and validation of the SWAT model followed the split-sample test approach proposed by Klemeš (1986). In this approach, the available records should be divided into two parts: calibration and validation. Therefore, the available data between 1998 and 2005 were used for calibration, whereas the validation was carried out between 2006 and 2013. These same periods were adopted for both daily and monthly simulations.

The 2nd version of the Sequential Uncertainty Fitting algorithm (SUFI-2) (Abbaspour et al., 2004, 2007) embedded in the SWAT-CUP software (Abbaspour, 2015) was used for automatic calibration, validation, and uncertainty analysis. SUFI-2 was selected because it can analyze many parameters and the measured data from many sites simultaneously, allowing dealing with complex and large-scale models (Rouholahnejad et al., 2014). The model parameters and the initial calibration range are presented in Table S1. The parameters were selected from previous studies (Neitsch et al., 2009; Rodrigues et al., 2019; Amorim et al., 2020) conducted in the Cerrado biome. The SWAT was calibrated running three iterations of 500 simulations each (Abbaspour et al., 2018). The objective function adopted to optimize the model calibration was the Nash efficiency coefficient (NSE), mathematically described in Equation 2. Furthermore, SWAT runs one iteration of 500 simulations using the final range of the parameters obtained from the calibration for validation and uncertainty analysis.

$$NSE=1-\left[\frac{\sum_{i=1}^n(O_i-P_i)^2}{\sum_{i=1}^n(O_i-O)^2}\right] \quad (2)$$

The uncertainty analysis in SUFI-2 was performed through the p-factor and r-factor. The percentage of measured data constrained in the 95% threshold forecast uncertainty band (95PPU) results is the p-factor. 95PPU has calculated at 2.5% and 97.5% levels of the cumulative distribution obtained by sampling the output variable in a Latin hypercube (Abbaspour, 2015). The r-factor means the average thickness of the 95PPU band divided by the standard deviation of the measured values. P-factor values vary from 0 to 100%, whereas r-factor ranges from 0 to ∞ . The values of p-factor $> 70\%$ and r-factor < 1.5 suggested by Abbaspour et al. (2015) for the uncertainty range were considered in this study.

The performance of the model was quantitatively evaluated using the “best simulation”, which is the simulation with a single set of parameters that maximized the objective function, applying percent bias (PBIAS) (Equation 3), Kling–Gupta efficiency (KGE) (Kling et al., 2012) (Equation 4), beyond the NSE and its logarithmic version (LNSE). The evaluation criteria adopted in this study was proposed by Moriasi et al. (2007): “Very good” ($NSE > 0.75$; $PBIAS < \pm 10$), “Good” ($0.65 < NSE < 0.75$; $\pm 10 < PBIAS < \pm 15$), “Satisfactory” ($0.50 < NSE < 0.65$; $\pm 15 < PBIAS < \pm 25$) and “Unsatisfactory” ($NSE < 0.50$; $PBIAS > \pm 25$). Furthermore, the criteria adopted for NSE were also considered for LNSE, and the KGE closest to indicates the best fit of the model.

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (3)$$

$$KGE = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + (\beta-1)^2 + (\gamma-1)^2} \quad (4)$$

$$\beta = \frac{\bar{P}}{\bar{O}} \quad \gamma = \frac{\sigma_P}{\sigma_O} \quad (5)$$

2.5 Regional Climate Models and Scenarios

In this study, the simulations of the future climate scenarios used as input to the SWAT model were derived from two GCMs: Hadley Centre Global Environmental Model version 2 (HadGEM2-ES) and Model for Interdisciplinary Research on Climate version 5 (MIROC5). The HadGEM2-ES is a GCM of earth system category developed by the Hadley Centre that uses a horizontal resolution of 1.875 x 1.275 degrees in latitude and longitude, respectively, and 38 layers in the atmosphere (Collins et al., 2011; Martin et al., 2011). The MIROC5 is a coupled ocean-atmosphere GCM developed by the Center for Climate System Research

(CCSR) of the University of Tokyo, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, and National Institute for Environmental Studies (NIES) (Watanabe et al., 2010). It has a horizontal resolution of 150 km and 40 layers in the atmosphere (Chou et al., 2014).

HadGEM and MIROC may not sufficiently capture local features, such as orographic influences, land-use, and landscape, due to their grid size (Chou et al., 2014). HadGEM2-ES and MIROC5 simulations are dynamically downscaled by the Eta/CPTEC model, in which the models are known as Eta/HadGEM2-ES and Eta/MIROC5, respectively. The Brazilian Center for Weather Forecasts and Climate Studies (CPTEC) has adapted Eta/CPTEC to run long-term integrations over Central and South America. Eta/CPTEC is more suitable to operate in regions containing steep orography due to its characteristics of the vertical coordinate (Marengo et al., 2012; Chou et al., 2014). The Eta/HadGEM2-ES and Eta/MIROC5 has approximately 20 km in the horizontal resolution, and their outputs were used to force the SWAT model in this study (Figure 1).

The Representative Concentration Pathways (RCPs) adopted in this study were RCP4.5 and RCP8.5, which are considered the anthropogenic and non-anthropogenic radiative forcings (4.5 and 8.5 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, respectively) by the end of the 21st century based on the IPCC Fifth Assessment Report (AR5). These data are available in the PROJETA platform (<http://projeta.cptec.inpe.br/>) developed in the framework of the Climate Change Policies Program (PoMuC), coordinated by the Ministry of Environment (MMA) of Brazil in the context of the Brazil-Germany Cooperation for Sustainable Development, within the International Climate Protection Initiative (IKI) of the German Federal Ministry for Environment, Nature Protection, Building and Nuclear Safety (BMUB). Data from AR5 was used since the information from AR6 downscaled with ETA/CPTEC is not yet available.

Precipitation, maximum and minimum temperatures from Eta/HadGEM2-ES and Eta/MIROC5 were obtained in grids over SM-TARB (Figure 1). Since the hydrological model is forced with biased RCM outputs, it can generate deviations in the simulated streamflow. A linear scaling method for precipitation and temperature (Teutschbein and Seibert, 2012) was applied to remove the bias. The IOD data closest to each grid point of the RCMs were used as observed data to remove systematic biases. The correction factors were obtained by comparing the baseline RCMs and the IOD from 1980 to 2010. The same procedure has been applied widely in many other studies using these RCM datasets (Oliveira et al., 2017, 2019; Rodrigues et al., 2019; Mello et al., 2021).

After performing the bias correction, monthly streamflow simulations from the baseline period (1980–2005) using calibrated SWAT model were compared to those from the three future periods (2010–2040, 2041–2070, and 2071–2099) for evaluating the climate-induced hydrological changes in streamflow in SM-TARB.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Performance of SWAT Calibrated and Validated with IOD Database

The final range and the best values of the parameters adjusted for both monthly and daily time steps are presented in the supplementary data (Table S1). The results of the precision statistics to appraise the quantitative analysis of the SWAT model using IOD data are shown in (Table 1). Values of p-factor and r-factor indicate that the streamflow simulation in both time steps presented low levels of uncertainties in the calibration and validation periods according to the criterion presented by Abbaspour et al. (2015).

According to p-factor results, the 95PPU band enveloped at least 97% and 85% of the observed streamflows on the daily and monthly time steps, respectively (Table 1).

Nevertheless, r-factor points to a narrower 95PPU band and, consequently, less uncertainty for monthly than daily scale.

[Insert Table 1]

The NSE values were greater than 0.87 in all streamflow simulations (Table 1), and the model performance can be classified as “very good” (Moriasi et al., 2007) in calibration and validation periods for both time steps. The model presented a similar performance in monthly and daily simulations, which indicates that the model can capture the streamflow behavior in SM-TARB in both time steps. Furthermore, Figure 2 shows that the model could adequately simulate the recession and the peak streamflows. The Pbias values (Table 1) show that, in general, the simulated streamflows slightly underestimated the observed ones on the daily scale by 0.5% and 6.0% in the period of calibration and validation, respectively. The simulation overestimated the observed streamflows by 5.8% and 0.5% in the calibration and

validation for the monthly scale, respectively. In both cases, the model performance can be classified as “very good” (Moriasi et al., 2007).

[Insert Figure 2]

The values of KGE indicated better performance of the SWAT model forced with IOD in the daily step, being 0.92 and 0.85 for calibration and validation, respectively. The lower KGE value (0.79) was found in the validation period. Since the KGE results from the NSE decomposition (Gupta et al., 2009) and its value is greater than or equal to the lowest value among r , β , and γ parameters (Franco et al., 2020), SWAT performance can be classified as “very good” in both time steps from the same criteria used for the NSE.

Analyzing the LNSE statistic (Table 1), the classification by Moriasi et al. (2007) indicates a “very good” fit for the calibration and validation of both time steps. Since recession periods highly influence the LNSE due to the reduction in amplitude provided by the logarithmic scale (Viola et al., 2009), it can be inferred that the SWAT model could adequately simulate the hydrological behavior in dry periods. LNSE values highlight that IOD datasets can be used to calibrate hydrological models and is a powerful tool for water resources management in the Cerrado biome.

3.2 SM-TARB Hydrological Behavior Simulated with SWAT

The SWAT model adequately simulated the hydrological components from 1998 to 2013 using IOD compared against the results presented in previous studies (Rodrigues et al., 2016; Junqueira et al., 2020). The SWAT estimated that evapotranspiration corresponds to 66% of average annual precipitation from 1998 to 2013 (1,519 mm). This estimative is close to that obtained in other studies in the Tocantins basin, Cerrado biome, such as Rodrigues et al. (2016) that found through the annual water balance that the evapotranspiration corresponds to 69% of the annual precipitation between 1975 a 2005.

SM-TARB has a robust natural hydrological regularization since baseflow is the dominant flow component and corresponds to 85% of the total water yield (406.8 mm). According to Junqueira et al. (2020), in a study carried out in the Pandeiros river basin in the Cerrado biome, the long-term ratio between baseflow and total streamflow is 80%, which is close to

the result obtained in the simulation with IOD. The baseflow plays an essential role in maintaining the streamflow in the Cerrado biome during the dry season since about 85% of the annual precipitation occurs between October and March (Cembraia Neto et al., 2021).

The daily streamflow duration curve (FDC) (Figure 3) reinforces the SWAT capability for hydrological simulation using IOD data in SM-TARB. It is possible to observe an agreement between the simulated and observed streamflows to 90% exceedance (Q_{90}), which some Brazilian environmental agencies use as a reference to establish water rights.

[Insert Figure 3]

Q_{90} simulated and observed was $145.8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ and $130.82 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, respectively, *i.e.*, SWAT overestimated it approximately by 11%. However, an overestimation of Q_{90} was also obtained in other studies using the SWAT model, such as Santos et al. (2018) in the Brazilian semi-arid region and Sousa et al. (2020) carried out in a tropical basin. In these studies, the simulated Q_{90} exceeded by 24% and 18%, respectively, its observed values.

Despite the suitable representation of the maximum streamflows, SWAT underestimated the highest flows (Figure 3). The model's capability in simulating the maximum streamflows can be verified through the average daily streamflow with a frequency lower than 5% (MaSi) (Mello et al., 2021). The observed and simulated MaSi obtained for SM-TARB were $2,465 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ and $2,222 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, respectively, which means an underestimation of 9.8% of the highest streamflows.

3.3 Climate Change Projections to the SM-TARB

Figure 4 shows the climate change projections of the monthly precipitation and maximum and minimum temperatures after bias correction using Eta/HADGEM2-ES and Eta/MIROC5 under the RCP4.5 and RCP8.5. Changes in mean monthly precipitation and maximum and minimum temperatures for each time slice projected by the RCMs compared with the baseline are shown in Table 2.

[Insert Figure 4]

[Insert Table 2]

Both Eta/MIROC5 and Eta/HadGEM2-ES projected reductions in precipitation in SM-TARB in all time slices and RCPs. However, reductions projected by Eta/HadGEM2-ES were greater than those from Eta/MIROC5. In general, there was a reduction in mean monthly precipitation in the rainy season (October to March) compared with the baseline (Figure 4), with exceptions in January of the first time slice projected by Eta/MIROC5 and RCP4.5.

The greatest decreases in precipitation were observed in the third time slice (2071-2099), except for Eta/HadGEM2-ES, which projected the greatest reduction in the first time slice (-29.7%). The driest scenarios projected by Eta/MIROC5 and Eta/HadGEM2-ES (-18.9% and -37.4%, respectively) were observed in the third time slice and under RCP8.5. These severe impacts projected by RCP8.5 were to be expected because it represents the highest radiative forcing. In addition, RCP8.5 presents greater uncertainties, as found by Mello et al. (2021) in a study performed in southeast Brazil. The 2041-2070 time slice showed a less accentuated reduction than the other periods in all scenarios, except in Eta/MIROC5 RCP4.5, which projected the lowest decrease in the first time slice.

The greatest warming was projected by Eta/HadGEM2-ES and reached 8.2 °C and 6.0 °C in maximum and minimum temperatures, respectively, toward the end of the 21st century. Considering the projections made by Eta/MIROC5-ES under the RCP4.5 in the third time slice, the maximum and minimum temperatures increased 2.4 °C and 2.0 °C, respectively. Despite the substantial increase in the temperatures, it is essential to highlight that these values varied between the climate models and have uncertainties related to GCMs and RCPs (Vetter et al., 2017). In South America, warming trends are greater when using Eta-HadGEM2-ES than Eta-MIROC5 under RCP8.5 as HadGEM2-ES is more sensitive to greenhouse gases increase (Chou et al., 2014). In addition, the greatest warming would tend to occur in Southeast and Central Brazil, where the Cerrado biome is located (Oliveira et al., 2019).

Decrease in monthly precipitation and increase in temperature projected by the RCM simulations throughout the 21st century affect the availability of water in the Cerrado biome. Therefore, ecosystem services and hydroelectric power generation might be affected by these climate change leading to social, economic, and environmental problems.

3.4 Projections of the Hydrological Impacts in the SM-TARB

The consequences of these climate changes on the streamflow are shown in Figure 5. The projected climate change impacts on the streamflow in the Cerrado biome were evaluated based on the calibrated SWAT model forced by Eta/HadGEM2-ES and Eta/MIROC5 runs under the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios. Eta/HadGEM2-ES simulated the greatest impacts in streamflow. For the first time slice (2010-2040), this RCM resulted in a greater runoff than ETA/MIROC5. Overall, throughout the 21st century, the greatest runoff decrease was projected by Eta/HadGEM in RCP4.5 in the first time-slice (2010-2040) whereas, in 2071-2099 was the time slice with the smallest difference compared to the baseline.

[Insert Figure 5]

The impacts of climate change on runoff were lesser with Eta/MIROC5 projections. An increase in the projected precipitation (Figure 5) is observed from Eta/MIROC5 under RCP4.5 in January in the first time slice, resulting in projected streamflow above the baseline. Conversely, the projected runoff for the other months was below the baseline.

Considering the Eta/HadGEM2-ES in RCP8.5 projections, runoff may reach 70% lower than the baseline values in the first time slice (Figure 6). Since this decrease occurs in the rainy season, this result is even more concerning for water resources management. Oliveira et al. (2019) also obtained a greater decrease in the wet period in a watershed in the Brazilian Cerrado, with an average reduction of 84.3% in the RCP8.5. Although SWAT had simulated lower runoff using Eta/MIROC5 projects, decreases of approximately 30% reinforce that the impacts of climate change in the Cerrado biome would reduce water availability, especially in the groundwater recharge because of the precipitation reduction in the rainy season, affecting the baseflow. Cambraia Neto et al. (2021) found reductions in average monthly recharge around 28.0%, 31.4%, 28.0%, 10.0 %, 13.4%, and 21.7% for October, November, December, January, February, and March, respectively, for the Eta-HadGEM2-ES in the Cerrado biome, Buriti Vermelho watershed.

[Insert Figure 6]

Mean annual runoff values towards the first and third time slice were the ones that present the greatest decrease (Table 3). In the first time slice, the reductions ranged from -8.40% to -51.79%, while decreases in the third time slice varied from -20.99% to -54.51%. However, lower reductions were projected in runoff from -13% to -42.38% on the second time slice. Oliveira et al. (2017) also observed in the study performed in the Grande River basin, Brazil, that the largest impacts of climate change were obtained during the third period (2071–2099).

[Insert Table 3]

The reduction in runoff could compromise agricultural production in the Cerrado since it depends heavily on irrigation in the region. The decrease in runoff may lead to a reduction in the volume of reservoirs used for irrigation. These reservoirs may be affected by the increase of 18.4% in evaporation and the direct impact of the reduction in the runoff (Althoff et al., 2020). Since the hydropower generation is a linear function of streamflow (Oliveira et al., 2017), the results point to a substantial decrease in hydropower potential throughout the 21st century in the Serra da Mesa.

4. CONCLUSIONS

The IOD was used as input in the SWAT model to streamflow simulation in the Cerrado biome. Then, from the SWAT model calibrated with the IOD, hydrological impacts of climate change projected by the RCM Eta/MIROC5 and Eta/HadGEM2-ES were carried out. Overall, the IOD climate data resulted in an adequate streamflow simulation in the Cerrado biome.

The simulations presented low levels of uncertainty, as pointed out by the p-factor and r-factor. At least 85% of the data were enveloped by 95 PPU, whose r-factor did not exceed 1.18. The statistical coefficients indicated that the performance of the SWAT model was “very good” both in the daily and monthly time step. NSE values were greater than 0.88 in both time steps for validation and calibration periods. The model also performed very well based on Pbias results.

An overestimation of the minimum streamflows was found. Conversely, the SWAT model forced with IOD presented a better representation of the highest streamflows. This aspect may have been influenced by the objective function adopted. The other components of the simulated hydrological cycle, such as evapotranspiration, surface runoff, and groundwater, were consistent with the behavior of the Cerrado biome found in previous studies.

In climate change simulations, Eta/HadGEM2-ES presented more impacts on streamflow than Eta/MIROC5. Decreases in precipitation ranging from 7.6% to 37.4% were observed for 2010-2040 and 2071-2099, respectively. The increases in maximum and minimum temperatures of 8.2 °C and 6.0 °, respectively, are expected towards the end of the 21st century.

The impacts of climate change will reflect in the streamflow reduction throughout the 21st century. According to hydrological simulations carried out with Eta/HadGEM2-ES under RCP8.5, streamflows can be reduced by up to 70%. On average, the greatest reductions in runoff occurred in the first and third time slice, reaching values of -54.51%.

Thus, the interpolated data provided simulations capable of being used for the water resources management in the Cerrado biome for both present and future time studies. Given the inherent uncertainty of the hydrological model, RCMs, and RCPS, the simulations of the average behavior of hydrological impacts caused by climate change can be performed from the forced SWAT model with IOD.

ACKNOWLEDGEMENTS

We greatly acknowledge the Brazilian National Water Agency and Sanitation (ANA) and Xavier et al. (2016) for providing the input data. We would also like to thank the National Institute for Space Research – Center for Weather Forecasting and Climate Research (INPE – CPTEC) for providing the climate change projections data. We also acknowledge CAPES for doctorate scholarship to the first and third authors, and CNPq for granting fellowship of research productivity (PQ) to the second and fourth authors (308947/2018-5 and 301556/2017-2).

CONFLICT OF INTEREST

The authors have no conflict of interest to declare.

REFERENCES

- Abbaspour, K.C. (2015). *SWAT-CUP: SWAT Calibration and Uncertainty Programs—A User Manual 2015*. Available online: https://swat.tamu.edu/media/114860/usermanual_swatcup.pdf (accessed on 15 December 2019)
- Abbaspour, K. C., Johnson, C. A., & van Genuchten, M. T. (2004). Estimating Uncertain Flow and Transport Parameters Using a Sequential Uncertainty Fitting Procedure. *Vadose Zone Journal*, 3(4), 1340–1352. <https://doi.org/10.2136/vzj2004.1340>
- 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, 733–752. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.027>
- Abbaspour, K. C., Vaghefi, S., & 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), 6. <https://doi.org/10.3390/w10010006>
- Abbaspour, K. C., Yang, J., Maximov, I., Siber, R., Bogner, K., Mieleitner, J., Zobrist, J., & Srinivasan, R. (2007). Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of Hydrology*, 333(2–4), 413–430. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.09.014>
- Alcântara, E., Curtarelli, M., Ogashawara, I., Stech, J., & Souza, A. (2013). A system for environmental monitoring of hydroelectric reservoirs in Brazil. *Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 8(1), 445–458. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1088>
- Althoff, D., Neiva, L., & David, D. (2021). Assessment of water availability vulnerability in the Cerrado. *Applied Water Science*, October, 1–14. <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01521-2>
- Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., de Moraes Gonçalves, J. L., & Sparovek, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6), 711–728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- Amorim, J. da S., Viola, M. R., Junqueira, R., Oliveira, V. A. De, & Mello, C. R. De. (2020). Evaluation of Satellite Precipitation Products for Hydrological Modeling in the Brazilian Cerrado Biome. *Water*, 12(9), 2571. <https://doi.org/10.3390/w12092571>
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Mutiah, 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), 73–89. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>
- Avila-Diaz, A., Benezoli, V., Justino, F., Torres, R., & Wilson, A. (2020). Assessing current and future trends of climate extremes across Brazil based on reanalyses and earth system model projections. *Climate Dynamics*, 55(5–6), 1403–1426. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05333-z>
- Cambraia Neto, A. J., Rodrigues, L. N., da Silva, D. D., & Althoff, D. (2021). Impact of climate change on groundwater recharge in a Brazilian Savannah watershed. *Theoretical and Applied Climatology*, 143(3–4), 1425–1436. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03477-w>
- Camera, C., Bruggeman, A., Hadjinicolaou, P., Pashiardis, S., & Lange, M. A. (2014). Evaluation of interpolation techniques for the creation of gridded daily precipitation ($1 \times 1 \text{ km}^2$); Cyprus, 1980-2010. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(2), 693–712. <https://doi.org/10.1002/2013JD020611>
- Cassalho, F., Daleles Rennó, C., Bosco Coura dos Reis, J., & Cláudio da Silva, B. (2020). Hydrologic Validation of MERGE Precipitation Products over Anthropogenic Watersheds. *Water*, 12(5), 1268. <https://doi.org/10.3390/w12051268>
- Chou, S. C., Lyra, A., Mourão, C., Dereczynski, C., Pilotto, I., Gomes, J., Bustamante, J., Tavares, P., Silva, A., Rodrigues, D., Campos, D., Chagas, D., Sueiro, G., Siqueira, G., & Marengo, J. (2014). Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Downscaling Scenarios. *American Journal of Climate Change*, 03(05), 512–527. <https://doi.org/10.4236/ajcc.2014.35043>
- Collins, W. J., Bellouin, N., Doutriaux-Boucher, M., Gedney, N., Halloran, P., Hinton, T., Hughes, J., Jones, C. D., Joshi, M., Liddicoat, S., Martin, G., O'Connor, F., Rae, J., Senior, C., Sitch, S., Totterdell, I., Wiltshire, A., & Woodward, S. (2011). Development and evaluation of an Earth-System model - HadGEM2. *Geoscientific Model Development*, 4(4), 1051–1075. <https://doi.org/10.5194/gmd-4-1051-2011>
- Cordeiro, M. L. P., Cardoso, G. da S. J., Dereczynski, C. P., Chrispim, Z. M. P., & Melo, M. T. C. De. (2021). Analysis of indicators of climate extremes and projection of groundwater recharge in the northern part of the Rio de. *Environment, Development and Sustainability*, 0123456789. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10668-021-01441-w>
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). (2011). *Mapa de solos do Brasil*. <http://mapoteca.cnps.embrapa.br/projetos.aspx>
- Ferreira, F. L. V., Vieira, F. de C. C., Sousa, I. de P., Figueiredo, F. P., & Frazão, L. A. (2020). Environmental diagnosis of water source in a Brazilian Cerrado watershed. *Caderno de Ciências Agrárias*, 12, 1–11. <https://doi.org/10.35699/2447-6218.2020.20739>
- Franco, A. C. L., Oliveira, D. Y. de, & Bonumá, N. B. (2020). Comparison of single-site, multi-site and multi-variable SWAT calibration strategies. *Hydrological Sciences Journal*, 65(14), 2376–2389. <https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1810252>
- Guilhon, L. G. F., Rocha, V. F., & Moreira, J. C. (2007). Comparação de Métodos de Previsão de Vazões Naturais Afluentes a Aproveitamentos Hidroelétricos. *Revista*

Brasileira de Recursos Hídricos, 12, 13–20.

- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1–2), 80–91. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>
- Huang, H., Liang, Z., Li, B., & Wang, D. (2019). A new spatial precipitation interpolation method based on the information diffusion principle. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 33(3), 765–777. <https://doi.org/10.1007/s00477-019-01658-2>
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. (2015). *Mudanças na cobertura e uso da terra 2000 - 2010 -2012*. Available online: http://maps.lapig.iesa.ufg.br/?layers=pa_br_uso_solo_500_ibge (Accessed on 15 July 2021).
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2013) *The Physical Science Basis*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, p. 1535.
- Jiménez, K. Q., Collischonn, W., & de Paiva, R. C. D. (2019). Data assimilation using the ensemble kalman filter in a distributed hydrological model on the tocantins river, Brasil. *Revista Brasileira de Recursos Hidricos*, 24, 1–15. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.241920180031>
- Junqueira, R., Viola, M. R., Amorim, J. da S., & de Mello, C. R. (2020). Hydrological response to drought occurrences in a brazilian savanna basin. *Resources*, 9(10), 1–11. <https://doi.org/10.3390/resources9100123>
- Junqueira, R., Viola, M. R., de Mello, C. R., Vieira-Filho, M., Alves, M. V. G., & Amorim, J. da S. (2020). Drought severity indexes for the Tocantins River Basin, Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, 141(1–2), 465–481. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03229-w>
- Klemeš, V. (1986). Operational testing of hydrological simulation models. *Hydrological Sciences Journal*, 31(1), 13–24. <https://doi.org/10.1080/02626668609491024>
- Latrubesse, E. M., Arima, E., Ferreira, M. E., Nogueira, S. H., Wittmann, F., Dias, M. S., Dagosta, F. C. P., & Bayer, M. (2019). Fostering water resource governance and conservation in the Brazilian Cerrado biome. *Conservation Science and Practice*, 1(9), 1–8. <https://doi.org/10.1111/csp2.77>
- Machado, A. R., Wendland, E., & Krause, P. (2016). Hydrologic Simulation for Water Balance Improvement in an Outcrop Area of the Guarani Aquifer System. *Environmental Processes*, 3(1), 19–38. <https://doi.org/10.1007/s40710-016-0128-4>
- Marengo, J. A., Chou, S. C., Kay, G., Alves, L. M., Pesquero, J. F., Soares, W. R., Santos, D. C., Lyra, A. A., Sueiro, G., Betts, R., Chagas, D. J., Gomes, J. L., Bustamante, J. F., & Tavares, P. (2012). Development of regional future climate change scenarios in South America using the Eta CPTEC/HadCM3 climate change projections: Climatology and regional analyses for the Amazon, São Francisco and the Paraná River basins. *Climate Dynamics*, 38(9–10), 1829–1848. <https://doi.org/10.1007/s00382-011-1155-5>
- Martin, G. M., Bellouin, N., Collins, W. J., Culverwell, I. D., Halloran, P. R., Hardiman, S. C., Hinton, T. J., Jones, C. D., McDonald, R. E., McLaren, A. J., O’Connor, F. M.,

- Roberts, M. J., Rodriguez, J. M., Woodward, S., Best, M. J., Brooks, M. E., Brown, A. R., Butchart, N., Dearden, C., ... Wiltshire, A. (2011). The HadGEM2 family of Met Office Unified Model climate configurations. *Geoscientific Model Development*, 4(3), 723–757. <https://doi.org/10.5194/gmd-4-723-2011>
- Mello, C. R., Vieira, N. P. A., Guzman, J. A., Viola, M. R., Beskow, S., & Alvarenga, L. A. (2021). Climate Change Impacts on Water Resources of the Largest Hydropower Plant Reservoir in Southeast Brazil. *Water*, 13(11), 1560. <https://doi.org/10.3390/w13111560>
- Melo, D. de C. D., Xavier, A. C., Bianchi, T., Oliveira, P. T. S., Scanlon, B. R., Lucas, M. C., & Wendland, E. (2015). Performance evaluation of rainfall estimates by TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis 3B42V6 and V7 over Brazil. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(18), 9426–9436. <https://doi.org/10.1002/2015JD023797>
- Mocenni, C., Sparacino, E., Vicino, A., & Zubelli, J. P. (2008). Mathematical modelling and parameter estimation of the Serra da Mesa basin. *Mathematical and Computer Modelling*, 47(7–8), 765–780. <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2007.06.010>
- Monteith, J. L. (1965). Evaporation and environment. *Symposia of the Society for Experimental Biology*, 19, 205–234.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Myers, N., Mittermeir, R. A., Mittermeier, C. G., Fonseca, G. A. B., & Kent, J. (2000). Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 403(6772), 853. <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/21564574.1998.9650003>
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2009). Soil & Water Assessment Tool Theoretical Documentation. In *Blackland Research Center, Temple, TX*.
- Nóbrega, M. T., Collischonn, W., Tucci, C. E. M., & Paz, A. R. (2011). Uncertainty in climate change impacts on water resources in the Rio Grande Basin, Brazil. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(2), 585–595. <https://doi.org/10.5194/hess-15-585-2011>
- Oliveira, P. T. s, Wendland, E., Nearing, M. A., Scott, R. L., Rosolem, R., & da Rocha, H. R. (2015). The water balance components of undisturbed tropical woodlands in the Brazilian cerrado. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(6), 2899–2910. <https://doi.org/10.5194/hess-19-2899-2015>
- Oliveira, V. A., Mello, C. R. De, Beskow, S., Viola, M. R., & Srinivasan, R. (2019). Modeling the effects of climate change on hydrology and sediment load in a headwater basin in the Brazilian Cerrado biome. *Ecological Engineering*, 133(April), 20–31. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.04.021>
- Oliveira, V. agosto, Mello, C. R. de, Viola, M. R., & Srinivasan, R. (2017). Assessment of climate change impacts on streamflow and hydropower potential in the headwater region of the Grande river basin, Southeastern Brazil. *International Journal of Climatology*, 37(15), 5005–5023. <https://doi.org/10.1002/joc.5138>
- Rodrigues, J. A. M., De Oliveira Andrade, A. C., Ribeiro Viola, M., & Vieira Morais, M. A.

- (2016). Indicadores hidrológicos para a gestão de recursos hídricos na bacia hidrográfica do rio Manuel Alves da Natividade, Tocantins. *Scientia Agraria*, 16(4), 58–79. <https://doi.org/10.5380/rsa.v16i4.47923>
- Rodrigues, J. A. M., Viola, M. R., Alvarenga, L. A., Mello, C. R. de, Chou, S. C., Oliveira, V. A. de, Uddameri, V., & Morais, M. A. V. (2019). Climate change impacts under representative concentration pathway scenarios on streamflow and droughts of basins in the Brazilian Cerrado biome. *International Journal of Climatology*, January, 1–16. <https://doi.org/10.1002/joc.6347>
- Rouholahnejad, E., Abbaspour, K. C., Srinivasan, R., Bacu, V., & Lehmann, A. (2014). Water resources of the Black Sea Basin at high spatial and temporal resolution. *Water Resources Research*, 50(7), 5866–5885. <https://doi.org/10.1002/2013WR014132>
- Sano, E. E., Rosa, R., Brito, J. L. S., & Ferreira, L. G. (2010). Land cover mapping of the tropical savanna region in Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment*, 166(1–4), 113–124. <https://doi.org/10.1007/s10661-009-0988-4>
- Santos, C., Almeida, C., Ramos, T., 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), 1137. <https://doi.org/10.3390/w10091137>
- Sousa, L. F., Santos, C. A. S., Gomes, R. L., Rocha, F. A., & de Jesus, R. M. (2020). Modeling land use change impacts on a tropical river basin in Brazil. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2016. <https://doi.org/10.1007/s13762-020-02997-2>
- Teutschbein, C., & Seibert, J. (2012). Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. *Journal of Hydrology*, 456–457, 12–29. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.05.052>
- Triana, J. S. A., Chu, M. L., Guzman, J. A., Moriasi, D. N., Steiner, J. L., Acero Triana, J. S., Chu, M. L., Guzman, J. A., Moriasi, D. N., & Steiner, J. L. (2019). Beyond model metrics: The perils of calibrating hydrologic models. *Journal of Hydrology*, 578(June), 124032. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124032>
- United States Department of Agriculture – Soil Conservation Service (USDA-SCS). (1972). Section 4: Hydrology. In *National Engineering Handbook*. United States Department of Agriculture: Washington, DC, USA, 1972
- Vetter, T., Reinhardt, J., Flörke, M., van Griensven, A., Hattermann, F., Huang, S., Koch, H., Pechlivanidis, I. G., Plötner, S., Seidou, O., Su, B., Vervoort, R. W., & Krysanova, V. (2017). Evaluation of sources of uncertainty in projected hydrological changes under climate change in 12 large-scale river basins. *Climatic Change*, 141(3), 419–433. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1794-y>
- Viola, M. R., de Mello, C. R., Chou, S. C., Yanagi, S. N., & Gomes, J. L. (2015). Assessing climate change impacts on Upper Grande River Basin hydrology, Southeast Brazil. *International Journal of Climatology*, 35(6), 1054–1068. <https://doi.org/10.1002/joc.4038>
- Viola, M. R., Mello, C. R. de, Acerbi Jr., F. W., & Silva, A. M. da. (2009). Modelagem

hidrológica na bacia hidrográfica do Rio Aiuruoca, MG. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 13(5), 581–590. <https://doi.org/10.1590/s1415-43662009000500011>

- Watanabe, M., Suzuki, T., O’Ishi, R., Komuro, Y., Watanabe, S., Emori, S., Takemura, T., Chikira, M., Ogura, T., Sekiguchi, M., Takata, K., Yamazaki, D., Yokohata, T., Nozawa, T., Hasumi, H., Tatebe, H., & Kimoto, M. (2010). Improved climate simulation by MIROC5: Mean states, variability, and climate sensitivity. *Journal of Climate*, 23(23), 6312–6335. <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3679.1>
- Xavier, A. C., King, C. W., & Scanlon, B. R. (2016). Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013). *International Journal of Climatology*, 36(6), 2644–2659. <https://doi.org/10.1002/joc.4518>
- Zhang, L., Ren, D., Nan, Z., Wang, W., Zhao, Y., Zhao, Y., Ma, Q., & Wu, X. (2020). Interpolated or satellite-based precipitation? Implications for hydrological modeling in a meso-scale mountainous watershed on the Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Hydrology*, 583(January), 124629. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124629>

Figure 1 Location of the study area, grid of meteorological data made available by Xavier et al. (2016), and points with information from the Regional Climate Model (RCM) ETA. SM: Serra da Mesa; TARB: Tocantins-Araguaia River basin.

Figure 2 Observed and estimated monthly (a) and daily (b) hydrographs and respective IOD hyetographs in the SM-TARB for calibration and validation of the SWAT model.

Figure 3 Observed and simulated FDC for SM-TARB.

Figure 4 Comparison between precipitation, maximum and minimum temperatures projected in the 21st century and their respective baselines.

Figure 5 Average monthly streamflow for the time slices and baseline.

Figure 6 Variation in the monthly average streamflow in relation to the baseline for the time slice.

Tables

Table 1. Precision statistics obtained in calibration and validation of SWAT in daily and monthly time steps.

Statistic	Daily simulation		Monthly Simulation	
	Calibration	Validation	Calibration	Validation
NSE	0.88	0.87	0.88	0.88
Pbias	0.50	6.00	-5.8	-0.50
LNSE	0.85	0.88	0.86	0.86
KGE	0.92	0.85	0.83	0.79
p-factor	0.98	0.97	0.85	0.90
r-factor	1.18	1.18	0.92	0.95

Table 2. Changes in precipitation and temperature in SM-TARB obtained from the different RCMs and scenarios for the different time slices.

RCM	Time Slice	Δ Precipitation (%)		Δ Maximum temperature ($^{\circ}$ C)		Δ Minimum temperature ($^{\circ}$ C)	
		RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
Eta/MIROC5	2010-2040	-7.6	-16.2	1.2	1.5	1.0	1.0
	2041-2070	-8.9	-11.7	1.9	2.7	1.7	2.3
	2071-2099	-12.3	-18.9	2.4	4.7	2.0	3.8
Eta/HadGEM2-ES	2010-2040	-29.7	-33.9	2.7	3.9	1.2	2.1
	2041-2070	-15.6	-27.6	3.4	5.5	2.3	3.9
	2071-2099	-18.8	-37.4	4.3	8.2	3.1	6.0

Table 3. Changes in runoff (ΔR) over the 21st century in relation to the baseline

RCM	RCP	Baseline	2010-2040	2041-2070	2071-2099
			ΔR (%)	ΔR (%)	ΔR (%)
Eta-HadGEM2-ES	4.5	482.36	-42.37	-13.34	-26.82
	8.5		-51.79	-42.38	-54.51
Eta-MIROC5	4.5	523.74	-8.40	-16.95	-20.99
	8.5		-20.77	-20.99	-35.51

Figure 1

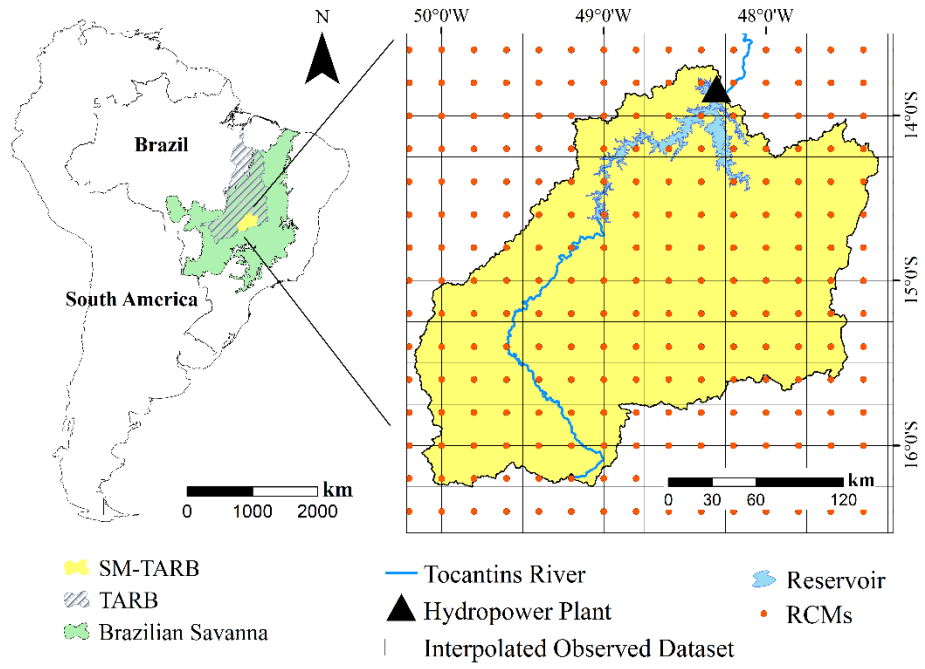


Figure 2

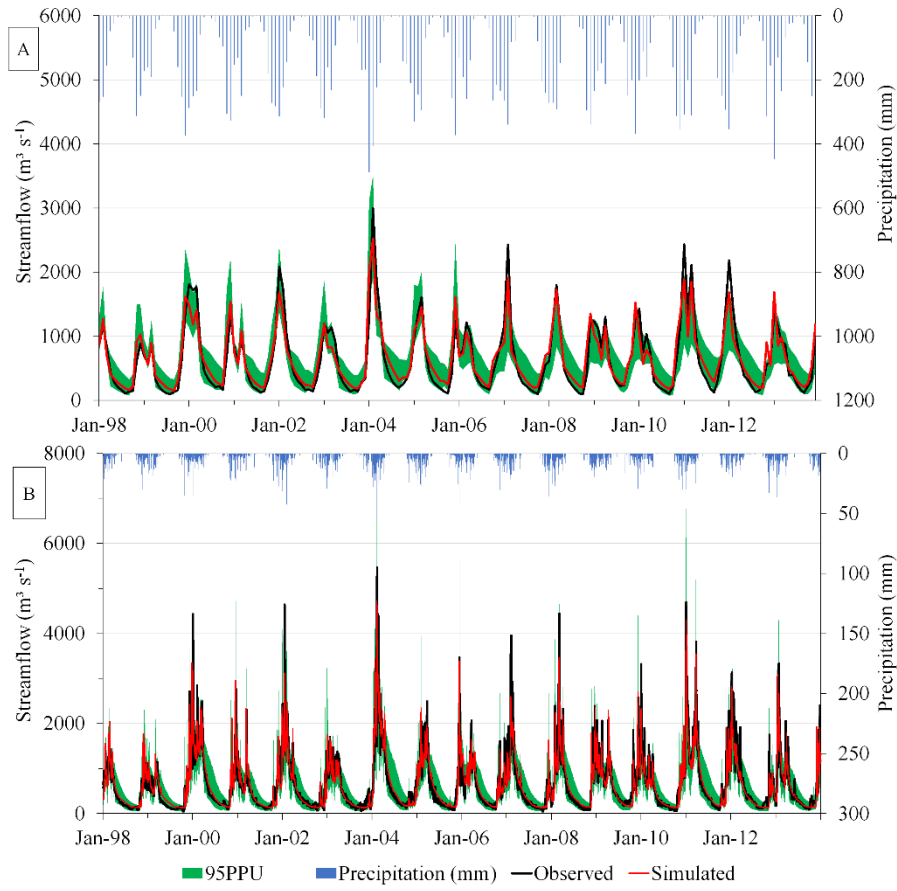


Figure 3

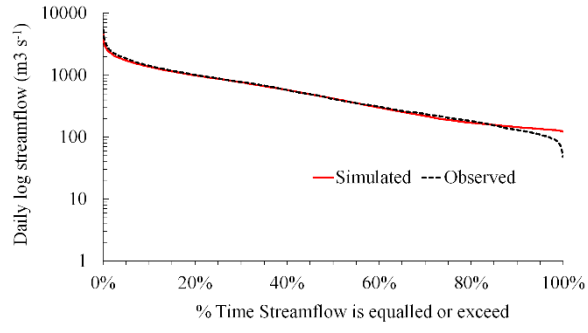


Figure 4

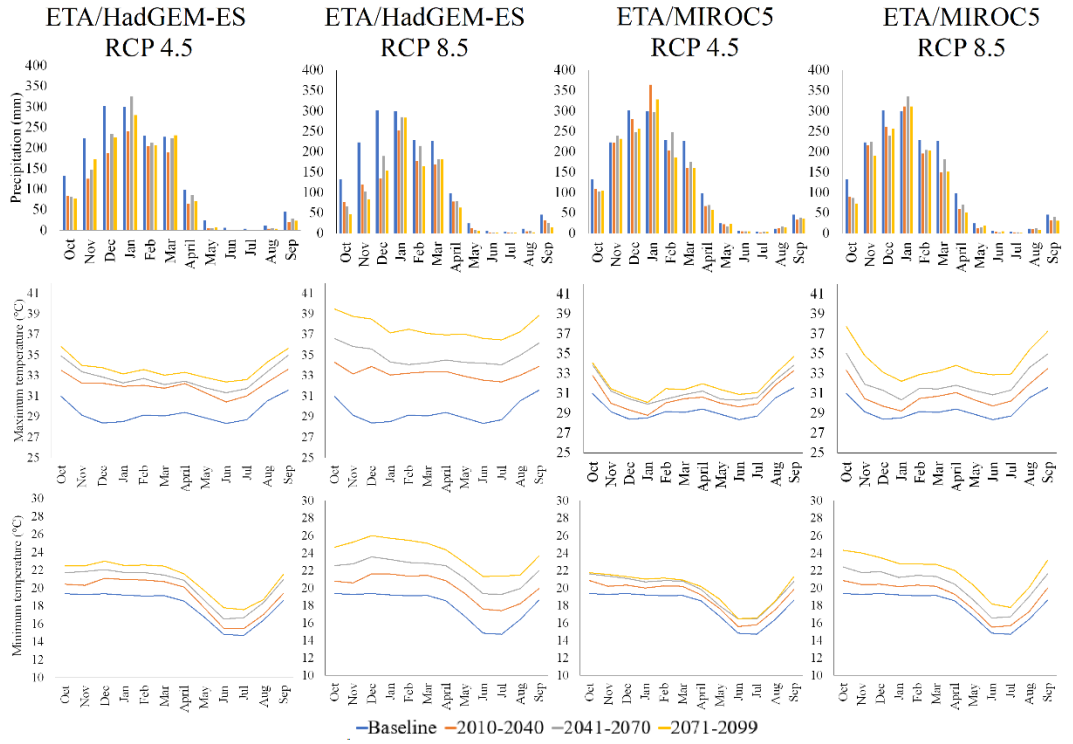
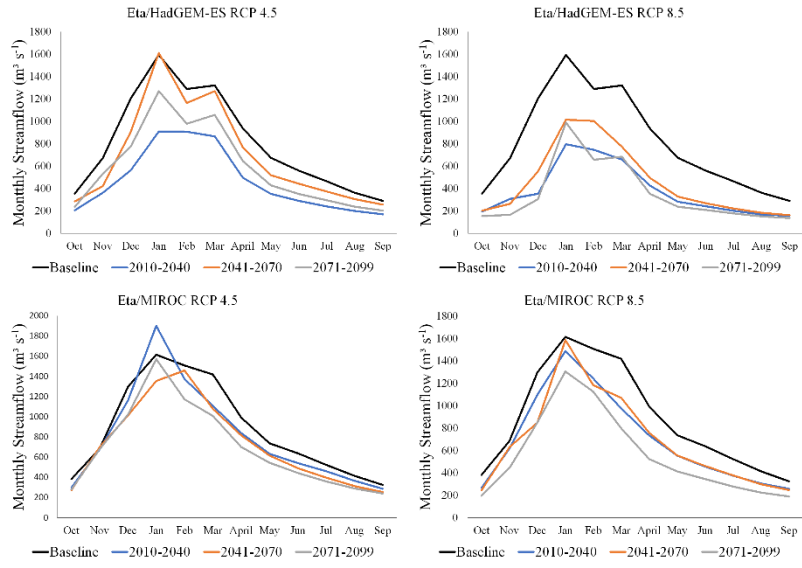


Figure 5



Modeling the Impact of Climate Change on Hydrology in a Data-Scarce Watershed Located in the Brazilian Tropical Savanna

Jhones da Silva Amorim, Marcelo Ribeiro Viola, Rubens Junqueira, Carlos Rogério de Mello, Nicole Lopes Bento, Junior Cesar Avanzi

Supplementary Material

Table S1. Parameter default values, initial range used in SWAT-CUP for calibration, and parameter values that produced the highest value of the statistical coefficient of NSE after two interactions of 500 simulations each using the SUFI-2 algorithm in daily and monthly time step.

Parameter	Initial range	Daily		Monthly	
		final range	best	final range	best
ESCO.hru †	0.5 – 0.95	0.66 – 0.95	0.861	0.5 – 0.771	0.548
CN2.mgt ‡	-0.2 – 0.2	-0.095 – 0.115	0.0018	-0.2 – 0.0114	-0.0598
ALPHA_BF.gw †	0.005 – 0.015	0.0085 – 0.015	0.0107	0.004 – 0.01	0.009
GW_DELAY.gw §	-30 – 60	-14.6638 – 35.1238	8.8857	-8.45 – 37.1938	-2.0175
GWQMN.gw §	-1000 – 1000	-665.1972 – 445.1972	330.8262	-83.2 – 1000	916.5934
CANMX.hru †	0 – 50	20.62 – 50	49.207	16.27 – 48.83	45.411
CH_K2.rte †	0 – 10	3.534 – 10	8.222	3.504 – 10	7.915
CH_N2.rte †	-0.01 – 0.3	0.016 – 0.205	0.05	0.086 – 0.279	0.195
EPCO.bsn †	0.01 – 1	0.01 – 0.65	0.273	0.39 – 1	0.976
GW_REVAP.gw †	0.02 – 0.2	0.1009 – 0.2	0.1392	0.0883 – 0.2	0.1708
REVAPMN.gw †	0 – 500	249.2015 – 500	344.254	198.7 – 500	320.1239
SOL_AWC ().sol ‡	-0.1 – 0.1	-0.1 – 0.01292	-0.036	-0.01 – 0.1	0.0736
SOL_K ().sol ‡	-0.1 – 0.1	-0.0207 – 0.1	-0.01	-0.01 – 0.1	0.045
SURLAG.bsn †	0.01 – 24	7.529 – 22.575	15.277	0.01 – 14.178	5.181
CH_N1.sub †	0.01 – 0.3	0.093 – 0.26	0.225		
CH_K1.sub †	0 – 5	0.462 – 3.488	1.675		
SLSOIL.hru †	0 – 150	36.807 – 112.293	88.062		
LAT_TTIME.hru †	0 – 150	0 – 84.842	31.307		
HRU_SLP.hru ‡	-0.25 – 0.25	-0.25 – 0.011	-0.219		
SLSUBBSN.hru ‡	-0.25 – 0.25	-0.047 – 0.25	0.208		

† replace; ‡ relative, § add