

Simulação de cenários hidrológicos na bacia hidrográfica do rio Jaguari/RS com a utilização do modelo SWAT

Simulation of hydrological scenarios in the Jaguari/RS river water basin using the SWAT model

Antônio Von Ende Dotto*, Luís Eduardo de Souza Robaina**, Romário Trentin***

*Departamento de Geociências, Universidade Federal de Santa Maria, dottovon@gmail.com

** Departamento de Geociências, Universidade Federal de Santa Maria, lesrobaina@gmail.com

*** Departamento de Geociências, Universidade Federal de Santa Maria, romario.trentin@gmail.com

<http://dx.doi.org/10.5380/raega.v60i0.94658>

Resumo

Os modelos hidrológicos são ferramentas computacionais que podem auxiliar na gestão de bacias hidrográficas através da modelagem do balanço hídrico. Essa modelagem permite a predição de impactos proporcionado pela incerteza do futuro quadro climático que afeta as atividades socioeconômicas e as condições do ambiente. Nesse sentido, esse estudo aplicou o modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) para simular cenários hidrológicos na Bacia Hidrográfica do Rio Jaguari. O período de simulação realizado foi determinado a partir da disponibilidade de dados para a modelagem e sua validação. Assim, nesse contexto de escassez de dados, o período de calibração foi 2013 a 2016 e o período de validação foi de 2017 a 2019. O método de calibração manual utilizado garantiu um balanço hídrico coerente em todos os processos hidrológicos simulados, alcançando bons resultados para a vazão, com coeficiente de eficiência de 0,74 e correlação de 0,86 durante a calibração, e coeficientes de 0,72 e 0,85 durante a validação. Após o ajuste do modelo, um cenário alternativo foi inserido, preservando as matas ciliares da rede hidrográfica da Bacia do Rio Jaguari, resultando em mudanças notáveis, como maior armazenamento de água subterrânea e aumento na vazão devido à maior fração de água no fluxo de base. A simulação hidrológica demonstrou êxito, evidenciando a capacidade da modelagem mesmo diante de limitações na aquisição de dados a nível nacional. Recomenda-se, em trabalhos futuros, a aplicação de cenários alternativos de uso da terra ou mudanças climáticas, aproveitando a calibração ajustada obtida.

Palavras-chave:

Modelagem hidrológica, Ambientes alterados, Estudos ambientais.

Abstract

Hydrological models are computational tools that can assist in the management of river basins through modeling the water balance. This modeling allows for the predicting impacts caused by the uncertainty of the future climate that affects socioeconomic activities and environmental conditions. In this sense, this study applied the *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) model to

simulate hydrological scenarios in the Jaguari River Basin. The simulation period carried out was determined based on the availability of data for modeling and validation. Therefore, in this context of data scarcity, the calibration period was from 2013 to 2016 and the validation period was from 2017 to 2019. The manual calibration method used ensured a coherent water balance in all simulated hydrological processes, achieving good results for flow, with an efficiency coefficient of 0.74 and correlation of 0.86 during calibration, and coefficients of 0.72 and 0.85 during validation. After adjusting the model, an alternative scenario was inserted, preserving the riparian forests of the Jaguari River Basin hydrographic network, resulting in notable changes, such as greater groundwater storage and increased flow due to the greater fraction of water in the base flow. The hydrological simulation demonstrated success, highlighting the modeling capacity even in the face of limitations in data acquisition at national level. It is recommended, in future work, to apply alternative scenarios of land use or climate change, taking advantage of the adjusted calibration obtained.

Keywords:

Hydrological modeling, Altered surfaces, Environmental studies.

I. INTRODUÇÃO

A movimentação cíclica da água pela superfície terrestre pode variar de acordo as características do ambiente sendo influenciada, principalmente, durante a fase terrestre do ciclo hidrológico ao ser alimentada pela precipitação. Para Ferket et al. (2003), a precipitação é uma das variáveis climáticas mais importantes para determinar o balanço hídrico, uma vez que é a fonte de água predominante do ciclo.

Estudos indicam que o ciclo hidrológico, pelo menos em escala regional, está sendo afetado por causa da transfiguração do espaço uma vez que os processos hidrológicos respondem diretamente às modificações no uso da terra (COHEN, 2007; FRITZEN, 2011; STERLING, 2013). Interferências antrópicas como a supressão vegetal, degradação do solo, alterações morfológicas na topografia, contaminação de águas e deposição irregular de resíduos são algumas alterações em ambientes que remodelam os processos hidrológicos (PINHEIRO, 2009; BOTELHO E SILVA, 2004; SPERA, 2016; ANACHE, 2017).

Além de impactos no uso e ocupação da terra, as mudanças climáticas são precursoras nas transformações do ciclo da água. Pesquisas (PBMC, 2013b; GROISMAN et al., 2005; MARENGO et al., 2008) trazem dados que apresentam propensão futura para ocorrências de fenômenos meteorológicos e eventos extremos (relacionados ao aumento pluviométrico) em maior frequência e intensidade para a região Sul do Brasil.

A resposta do ciclo hidrológico a mudanças climáticas ou do uso da terra são importantes para planejar ações de mitigação de perdas e danos ao ambiente natural e a sociedade. Isso posto, o monitoramento de

variáveis hidrológicas a partir de modelos hidrológicos são ferramentas que podem auxiliar na gestão de bacias hidrográficas através da modelagem de processos hidrológicos e a predição de impactos proporcionado pela incerteza do futuro quadro climático que afeta as atividades socioeconômicas e as condições do meio ambiente.

Um dos modelos bem estabelecido e amplamente utilizado é o modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) desenvolvido para o Departamento de Agricultura (ARS/USDA) dos Estados Unidos e que possui 8 componentes principais: hidrologia, clima, sedimentação, temperatura do solo, crescimento vegetal, nutrientes, pesticidas e manejo agrícola.

As aplicações com SWAT são recorrentes e utilizadas, principalmente, para simulação do balanço hídrico de determinada bacia hidrográfica (SETEGN, 2008; PISINARAS, 2010; ANDRADE, 2013). Porém, o potencial de modelagem para simulações de cenários sintéticos faz com que seja possível realizar análise do comportamento hidrológico em alternativos tipos de uso e ocupação da terra (MACHADO, 2003; GHAFARI, 2010; BLAINSKI, 2017; TRENTIN, 2023) ou até mesmo no contexto de mudanças climáticas (VALÉRIO, 2015; SOUSA, 2019).

A Bacia Hidrográfica do Rio Jaguari (BHRJ) está localizada na região Centro-Oeste do Rio Grande do Sul e possui uma extensão territorial de 5.141,62 km² localizando-se cerca de 450 quilômetros da capital de Porto Alegre. Na figura 1, pode ser conferido que a BHRJ está inserida na Região Hidrográfica do Uruguai (RHU); o Rio Jaguari se situa pela margem direita do Rio Ibicuí, o qual é um dos principais tributários do Rio Uruguai. O canal principal do Rio Jaguari percorre uma extensão de 539 km até alcançar sua foz com direção de fluxo no sentido Nordeste a Sudoeste.

Devido sua geolocalização na região central do RS, a BHRJ está em um ambiente de transição de aspectos fisiográficos. Isso é perceptível pelo relevo diversificado da área de estudo e das vegetações predominantes tanto da mata atlântica como dos campos pampeanos e que irão influenciar nas diferenças de práticas do uso da terra, mas com finalidade principal para as atividades agropecuárias (SANTOS, 2018). Essa dinâmica espacial também faz com que as sub-bacias dentro da área de estudo tenham características que se diferenciam uma das outras e, conseqüentemente, alterando os processos hidrológicos incidentes.

Dessa maneira, o presente trabalho objetiva a calibração e simulação de dois cenários hidrológicas para a Bacia Hidrográfica do Rio Jaguari - RS, sendo o primeiro a avaliação do balanço hídrico a partir do mapeamento de uso da terra em condições recentes e o segundo cenário a partir de um cenário alternativo que apresenta a conservação das matas ciliares na área de estudo.

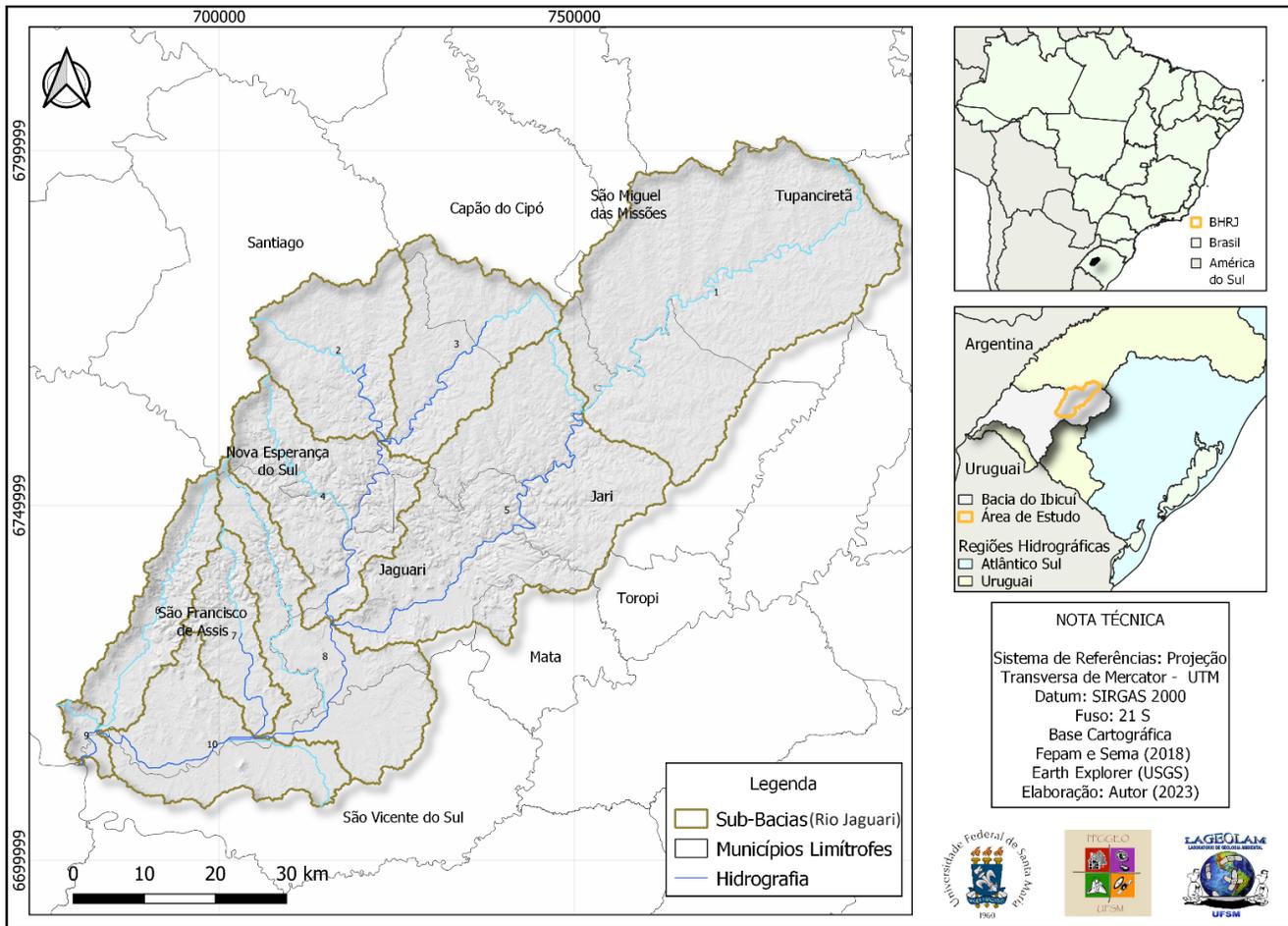


Figura 1 - Mapa de Localização da área de estudo. (Autores, 2024).

II. MATERIAIS E MÉTODOS

Para realizar a modelagem hidrológica com eficácia, a organização de banco de dados é uma etapa fundamental. O modelo SWAT requer dados de entrada complexos de tipo tabulares e cartográficos. Os dados tabulares são aqueles que contemplam informações climáticas e pedológicas. Enquanto os dados cartográficos são mapas relativos à declividade, solos e uso da terra. Na Tabela 1, é apresentada a síntese das informações que são necessárias para imputar ao modelo e suas respectivas fontes.

Tabela 1 - Detalhes da fonte e descrição dos dados requisitados pelo modelo

Tipo do Dado	Informação	Descrição	Fonte
Cartográfico	Modelo Digital de Elevação	Resolução Espacial de 30m	SRTM (USGS)
Cartográfico	Solos	Escala 1:250.000	IBGE (2002)
Cartográfico	Uso e ocupação da terra	Resolução Espacial de 30m	Adaptado de MapBiomass – Coleção 7
Tabular	Perfis pedológicos	Granulometria, profundidade, densidade, condutividade hidráulica etc.	Levantamento de Reconhecimento de Solos do Rio Grande do Sul (1973).
Tabular	Precipitação diária	Dados de Reanálise	W3S - Water
Tabular	Temperaturas Mínimas e Máximas	Dados de Reanálise	Global Wheater Data
Tabular	Radiação solar, umidade relativa do ar e velocidade do vento	Dados de Reanálise	WXGEN

Fonte: Autores (2024)

O delineamento espacial da área de estudo inicia-se com a delimitação automatizada de sub-bacias por meio do fluxo de direção e área acumulada das células do MDE. A escolha do MDE consistente, bem como a aferição dos dados gerados através de bases cartográficas existentes e imagens de satélite possibilitaram a definição mais próxima da realidade possível. Isso se deu a partir da seleção de pontos de exutório específicos e previamente conhecidos da bacia para que o modelo realizasse uma delimitação sem “ruídos”. Posteriormente, são definidas as Unidades de Resposta Hidrológicas (URH) que são originadas a partir do cruzamento dos dados cartográficos: tipo de solo, uso da terra e declividade. Conforme Neitsch et al., (2005), depois da delimitação das URHs, o modelo calcula os fluxos de cada uma; em seguida, os resultados de cada UHR são agregados para computar o que é gerado pela sub-bacia; e por último, as respostas geradas por sub-bacias são direcionadas para os canais dos rios de acordo com a rede de drenagem existente na bacia hidrográfica para enfim estimar a vazão final.

Para gerar o mapa de declividade, optou-se pelo uso do Modelo Digital de Elevação (MDE) obtido da missão *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), com resolução espacial de 1 arc-second (30 metros) adquirido pelo site do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS). A escolha deste modelo está associada a

consistência deste modelo principalmente relacionado aos filtros e processamentos realizados pela USGS quanto às máscaras de água, o que possibilita, dentre os modelos digitais de elevação, inclusive mais novos, uma melhor representação da hidrográfica e, isto é essencial neste tipo de análise.

Para as informações relativas aos solos da área de estudo, foi utilizado o mapa de solos disponibilizado na escala de 1:250.000 pelo IBGE e pelo Programa Nacional de Solos do Brasil (Pronassolos). São necessários informações tabulares relacionadas aos perfis pedológicos que contemplam parâmetros como: número de horizontes, grupo hidrológico, granulometria, condutividade hidráulica saturada etc. Para a obtenção desses parâmetros elencados, utilizou-se o Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Estado do Rio Grande do Sul, produzido pelo Ministério da Agricultura no Boletim Técnico de N.º30 (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, 1973) o qual descreve as informações a partir dos perfis de solos.

O uso e ocupação da terra da BHRJ foi obtido através da Coleção 7 dos mapas de Cobertura e Uso do Solo do ano de 2019 de todo o Brasil em formato *GeoTiff* do MapBiomas Brasil (<https://brasil.mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas/>). Com o mapeamento do MapBiomas, obteve-se as classes de uso da terra agrupadas em: campos, mata, água, agricultura e áreas urbanas. Foi inserido apenas um dado cartográfico referente ao uso da terra no ano de 2019 pois as alterações que ocorreram na cobertura vegetal durante o período simulado não foram expressivas e, o objetivo principal do trabalho foi, além de estabelecer a calibração do modelo, analisar um cenário referente a alterações do uso do solo de forma a identificar os impactos causados no balanço hídrico.

Em virtude de haver outras atividades antrópicas com significativa extensão e de impacto para o território, adicionou-se as classes referentes a silvicultura e rizicultura. A delimitação e refinamento dessas novas unidades se estabeleceu a partir de análise de imagem via satélite por meio de chaves de interpretação e vetorização manual.

Quanto às informações climáticas, os dados de temperatura mínima e máxima foram adquiridos utilizando a plataforma *Global Weather Data for SWAT* (<https://globalweather.tamu.edu/>), que disponibiliza dados originários do *Climate Forecast System Reanalysis* (CFSR). Demais dados tabulares que necessitam serem inseridos no modelo, são informações sobre a radiação solar, umidade relativa do ar e velocidade do vento os quais foram adquiridos pelo gerador de condições atmosféricas WXGEN próprio do SWAT (SHARPLEY e WILLIAMS, 1990), que foi desenvolvido originalmente para o modelo EPIC. Esse gerador climático utiliza dos dados disponíveis de precipitação e temperatura para a estimativa de suas variáveis. Em especial a precipitação porque é sensível ao número de dias secos ou úmidos em um determinado mês para calcular a radiação solar.

Não existem informações de precipitação de estações pluviométricas que sejam representativas para toda Bacia do Rio Jaguari e as estações que estão disponíveis possuem falhas de continuidade. Assim, os dados de precipitação utilizados foram plataforma World Weather for Water Data Service (W3S) recomendada pelos desenvolvedores do SWAT e que é implantado em um servidor da Universidade de Guelph (<https://www.uoguelph.ca/watershed/w3s/>). Essa plataforma utiliza o algoritmo Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG) que combina informações da constelação de satélites GPM para estimar a precipitação na maior parte da superfície da Terra com uma resolução espacial fina ($0,1^\circ$) e temporal de 30 minutos (HUFFMAN et al. 2020). Ao selecionar uma região específica, os dados meteorológicos podem ser baixados em vários formatos compatíveis com modelos hidrológicos, como SWAT e formato CSV genérico. Para Ghimire et al., (2022), o IMERG possui uma simulação satisfatória a boa de precipitação na maioria das regiões do mundo.

Para o manuseio de dados geoespaciais foi utilizado o software ArcGis 10.7.1 disponibilizado pela ESRI (REDLANDS, EUA). Com a instalação da extensão ArcSWAT no sistema do SIG, é acrescentado uma aba de ferramentas no layout principal o qual é possível criar um projeto para o seguimento dos processos de modelagem.

A etapa de calibração durante a modelagem consiste na alteração sistemática dos parâmetros do modelo SWAT até que os resultados simulados estejam estatisticamente similares com os dados observados. Os dados de precipitação do W3S-Water são disponíveis até 2019, e os dados observados de vazão da estação fluviométrica utilizada - estação Jaguari (código: 76440000; coordenadas geográficas: $29^\circ 30' 10.28''$ S e $54^\circ 41' 15.70''$ W) de responsabilidade da Agência Nacional das Águas (ANA) - para avaliar o desempenho do modelo possui muitas falhas de continuidade na série histórica a partir dos anos de 2020. Dessa forma, nesse panorama de disponibilidade de dados foi determinado os anos de 2013 a 2016 para realizar a calibração e o os anos de 2017 a 2019 para a validação do modelo, ambos em escala diária, considerando 2010 a 2012 o período de aquecimento.

Assim, o método adotado de ajuste para a calibração foi de substituição direta de forma manual com base na modificação de parâmetros selecionados com consulta na literatura. Citam-se trabalhos de Baltokoski et al. (2010), Salles (2012), Marcon (2013), Silva (2014), e Medeiros (2014) que também utilizaram o método manual para calibrar o modelo hidrológico atingindo bons resultados. E para a avaliação de sensibilidade dos parâmetros, alguns trabalhos consultados foram Lelis et al., (2012), Souza et al., (2015), Nunes et al., (2022) e Brighenti et al., (2017).

Após a calibração foi realizada a simulação hidrológica a partir de um cenário sintético da bacia hidrográfica em estudo com conservação de suas matas ciliares para avaliar os efeitos no balanço hídrico em ambientes alterados uma vez que é uma problemática da área de estudo o conflito de uso da terra em áreas de preservação. O mapeamento da mata ciliar foi feito a partir da delimitação de APP's conforme o Art. 4 da Lei Federal 12.651/2012 (BRASIL, 1965), que considera área de preservação permanente, as florestas e demais formas de vegetação natural situadas: a faixa marginal dos cursos hídricos e ao redor de nascentes/olhos d'água, intermitentes ou perenes. Então, foram geradas as APP's utilizando a base cartográfica de hidrografia organizada pela FEPAM e SEMA, de escala 1:25.000 e inserido um buffer de 30 metros nas linhas representando os rios e um buffer de 50 metros nos pontos representando as nascentes.

Para avaliar o desempenho da modelagem, foram utilizados três indicadores estatísticos: Coeficiente de Correlação (r), Coeficiente de Eficiência (COE) e Porcentagem de Viés (PBIAS). A classificação de desempenho e as equações matemáticas aplicadas para cada indicador podem ser conferidos na Figura 2.

Desempenho	COE	r	PBIAS
Muito bom	0,75<COE<1	0,80 < r ≤ 1	PBIAS< ± 10
Bom	0,65<COE<0,75	0,70 < r ≤ 0,80	± 10<PBIAS<±15
Satisfatório	0,50<COE<0,65	0,60 < r ≤ 0,70	± 15<PBIAS<±25
Insatisfatório	COE<0,50	r ≤ 0,60	PBIAS<±25
EQUAÇÕES	$COE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E_{obs} - E_{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (E_{obs} - \bar{E})^2}$	$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$	$P_{BIAS} = \left(\frac{\sum_{i=1}^n Q_{ei} - \sum_{i=1}^n Q_{oi}}{\sum_{i=1}^n Q_{oi}} \right) \cdot 100$

Figura 2 - Classificação de desempenho para os indicadores estatísticos utilizados: Coeficiente de Correlação - r, Coeficiente de Eficiência - COE e Porcentagem de Viés - PBIAS. (Fonte: Adaptado de Moriasi et al.,2007)

III. RESULTADO E DISCUSSÃO

Definição de Unidades de Resposta Hidrológica

A partir da combinação das declividades, uso da terra e tipo de solo, o software gerou um total de 659 Unidades de Resposta Hidrológica para a Bacia do Rio Jaguari. O mapa de declividade foi classificado em 3 intervalos distintos: < 5%, 5 – 15% e > 15%. A classe de declividade entre 5 e 15% está bem distribuída na bacia com maior extensão territorial de todas. Essas inclinações são caracterizadas por formas de colinas onduladas que condicionam atividade agropecuária de maneira intensa.

As declividades que compõem a topografia têm extrema importância como fator pedogenético devido a mesma ser responsável pelo controle da dinâmica dos fluxos de água na paisagem, como a lixiviação de solutos, a atuação de processos erosivos e as condições de drenagem. Assim, a cobertura pedológica na área de estudo é definida por 08 tipos de solos da base cartográfica do Pronassolos. Demais informações quantitativas sobre os solos podem ser verificadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Informações sobre os solos na Bacia Hidrográfica do Rio Jaguari.

Solo	N.º de Horizontes	Grupo Hidrológico	Profundidade do perfil (cm)	Área (km²)
Gleissolo Háptico	3	D	85	53,2
Latossolo Vermelho	5	B	300	860,8
Argissolo Bruno Acinzentado	5	C	150	292,3
Argissolo Vermelho	6	B	300	2144,2
Argissolo Vermelho Amarelo	6	B	210	21,7
Planossolo Háptico Eutrófico	6	D	200	227,6
Neossolo Litólico	1	C	15	876,8
Neossolo Chernossólico	1	C	20	660,3

Fonte: Os autores (2024)

O último plano de informação cartográfica utilizado é o mapeamento de uso e ocupação da terra (adaptado do MapBiomas). As aptidões do solo relacionadas com as formas de relevo condicionam os diferentes uso e ocupação da terra no espaço territorial. Pode ser identificado na BHRJ as classes de: Soja, Campos, Mata Nativa, Silvicultura, Arroz, Água e Mancha Urbana. Ocorre predominância da classe de campos para o uso e ocupação da terra e estão distribuídos em todas as regiões da bacia sendo sua principal ocupação para a prática da pecuária. Salienta-se a expressividade do cultivo da soja ao decorrer do território da BHRJ e a maior quantidade de mata nativa em encostas declivosas. No mosaico da Figura 3, identificam-se os mapas utilizados para a definição das URHs e a distribuição das sub-bacias.

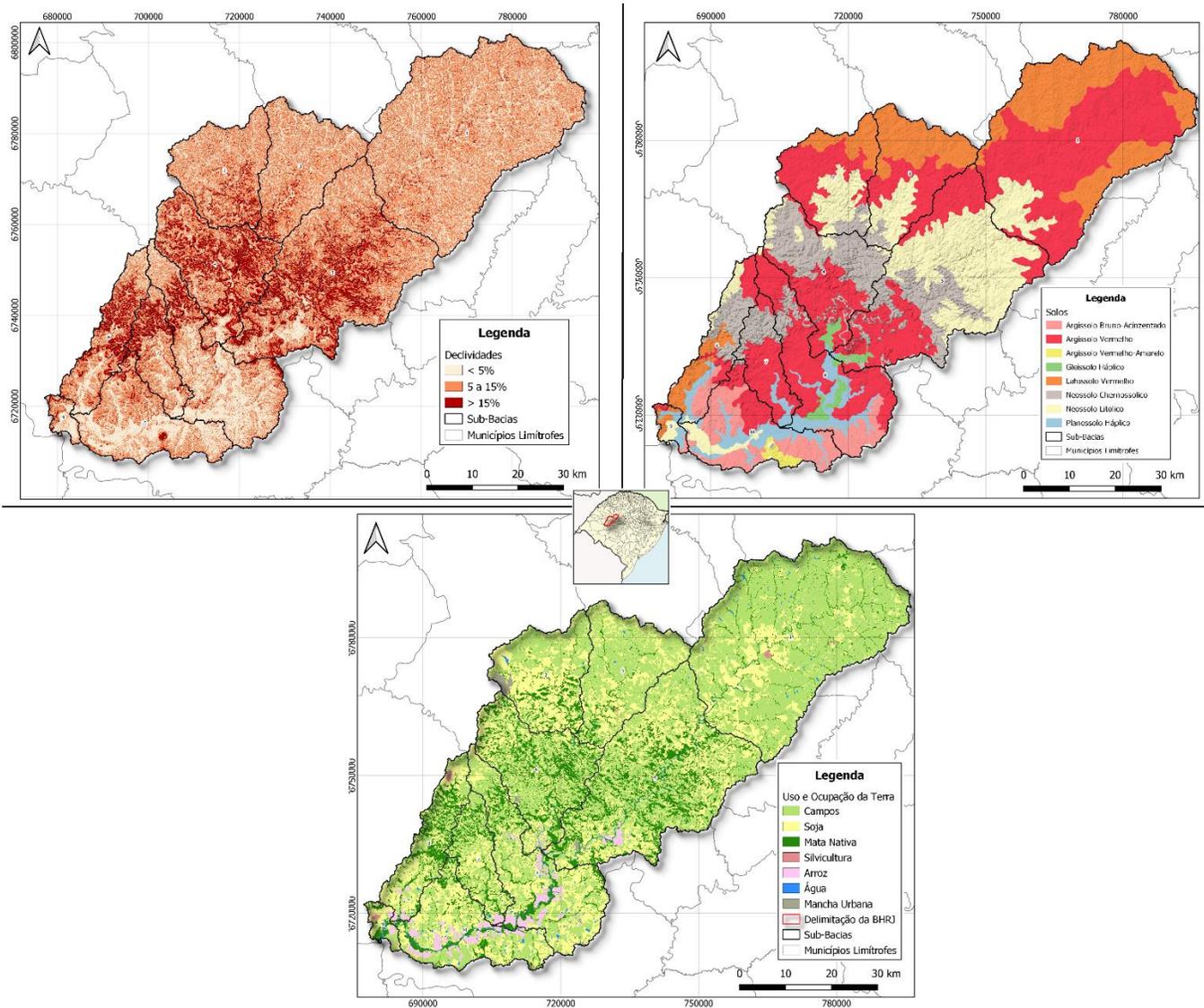


Figura 3 - Mosaico de mapas utilizados para definição de URHs na Bacia Hidrográfica do Rio Jaguarí. (Fonte: Autores)

Reforça-se que a utilização de informações fixas do uso da terra para a modelagem não interfere significativamente nos resultados alcançados, uma vez que o período simulado é curto e as alterações na superfície não são de grande proporção afetando a escala do mapeamento utilizado (30m). Por isso, a utilização de dados atualizados para uma simulação contínua e histórica é amplamente adotada em trabalhos de modelagens (SOUZA, 2013; MARTINS, 2020; PASSOS, 2021).

Calibração em Escala Diária

Durante a calibração do modelo utilizando dados diários de vazão, levou-se em consideração a coerência de todo balanço hídrico e em modificações nos parâmetros que ocasionariam na redução da vazão visto o resultado superestimado da modelagem na primeira simulação sem calibração. Na tabela 2, compreendem-se os parâmetros selecionados para a calibração e suas alterações realizadas do ano de 2013 a 2016.

A mudança no valor de CH_K2 de 0 para 30 mm/h indica uma moderada taxa de perda de água no fluxo principal, atribuída à presença de materiais como areia e cascalho no curso fluvial. O parâmetro CANMX, que representa a capacidade máxima de armazenamento de água em um dossel de planta, foi ajustado para 5, visando uma resposta adequada da evapotranspiração. Esse valor determinou-se a partir dos trabalhos de Van Griensven et al., (2006) e Leta et al., (2015) que estabeleceram como variação máxima possível para esse parâmetro entre 0 e 10 mm.

Para Chow (1959), não existem métodos exatos para determinar o coeficiente de rugosidade de Manning para escoamento superficial (OV_N). Portanto, esse coeficiente foi aumentado para aumentar a resistência ao escoamento e reduzir a vazão, uma vez que a rugosidade aumenta a resistência ao escoamento e uma superfície mais rugosa resulta em uma vazão menor para uma determinada inclinação do canal e área de seção transversal.

O tempo de retardo entre a saída de água do perfil do solo e a entrada em um aquífero raso (GW_DELAY) foi aumentado pois quanto maior o valor desse parâmetro, menor é a recarga do aquífero raso porque é maior a quantidade de fluxo hídrico na zona vadosa, conseqüentemente, isso pode resultar em uma redução da contribuição da água subterrânea para a vazão total.

O coeficiente de compensação de evaporação do solo (ESCO) foi reduzido para 0,75, permitindo que o modelo extraia mais água de níveis mais baixos do solo. Através dessa alteração, pelo menos 75% da demanda evaporativa do solo é atendida pelos centímetros superiores da camada, sendo o restante fornecido por camadas inferiores do solo.

A diminuição de SURLAG foi realizada para armazenar mais água, retardando a entrada de parte do escoamento superficial no canal principal. Isso foi necessário pois em grandes bacias, o tempo de concentração da água é superior a um dia e somente apenas uma porção do escoamento superficial irá alcançar o canal principal no dia em que foi gerado.

Extensão	Parâmetro	Valor Default	Valor Final	Unidade de Medida
URH	CANMX	0	5	mm

<i>URH</i>	ESCO	0,95	0,75	adim
<i>URH</i>	OV_N	0,15	2	adim
<i>Routing</i>	CH_K2	0	30	mm/h
<i>Groundwater</i>	REVAPMN	750	900	mm
<i>Groundwater</i>	GW_DELAY	31	60	dias
<i>Groundwater</i>	GWQMN	1000	2000	mm
<i>Groundwater</i>	ALPHA_BF	0,01	0,7	dias
<i>Groundwater</i>	SURLAG	4	2	adim

Tabela 3 - Parâmetros selecionados para a calibração do modelo.

Fonte: Autores (2024).

O parâmetro GWQMN representa a profundidade mínima do aquífero raso para a ocorrência de escoamento subterrâneo, A água subterrânea atinge a superfície apenas quando a profundidade no aquífero raso é igual ou superior ao valor de GWQMN. Reduzir esse parâmetro resulta no aumento do fluxo de base, entretanto, é acompanhado por um aumento na capilaridade, como observado por Salles (2012).

Outro parâmetro relevante é o ALPHA_BF, um índice que quantifica a resposta do fluxo de águas subterrâneas às mudanças na recarga. Seus valores variam de 0,1 a 0,3 para terrenos com resposta lenta e de 0,9 a 1,0 para resposta rápida. Na Bacia Hidrográfica do Rio Jaguari (BHRJ), características como elevada amplitude altimétrica, declividades onduladas e solos permeáveis indicam uma resposta rápida à recarga, sendo estabelecido um valor de constante de recessão do escoamento de base de 0,7 dias.

Essas alterações visam melhorar a representação do comportamento hidrológico da bacia hidrográfica no modelo SWAT, visto que, a calibração para Adriolo (2008) é a etapa da modelagem mais importante e

trabalhosa. Para Green e Griesven (2008), quando os valores de Coeficiente de Eficiência são superiores a 0,4 e os valores de Coeficiente de Correlação são superiores a 0,5 em uma simulação de escala diária, o desempenho já pode ser considerado satisfatório.

Análise das Simulações

Com a parametrização final, todos os anos do período de calibração (2013- 2016), com exceção de 2014, obtiveram resultados simulados muito bons conforme os principais indicadores estatísticos utilizados. Existe uma correlação muito forte para os anos analisados com uma leve tendência a subestimação dos resultados.

É perceptível ao analisar o regime pluviométrico dos hidrogramas a seguir, a alternância de períodos de estiagens e períodos chuvosos na área de estudo. Essa variação é causada pelas anomalias do padrão de temperatura da superfície do Oceano Pacífico Tropical. Com essas anomalias, a circulação atmosférica afetada altera a temperatura do ar, e principalmente, a precipitação pluviométrica. A fase quente (El Niño) desse fenômeno está associada aos períodos secos nas regiões tropicais e aos períodos úmidos nos extratropicais. Enquanto a fase fria (La Niña) é marcada por eventos contrários: períodos úmidos nos trópicos e secos e frios fora deles (FONTANA E BERLATO, 1997).

Durante o ano de 2013, a eficiência do modelo foi muito boa (COE = 0,77) com uma correlação muito forte ($r = 0,87$). Mas pode-se afirmar que de maio a outubro de 2013, a simulação foi insatisfatória pois não foi modelado os picos de vazão provenientes da água precipitada (Figura 4), havendo ênfase na simulação para o escoamento de base representada pela linearidade de baixa vazão durante esses meses mesmo quando existiam períodos chuvosos.

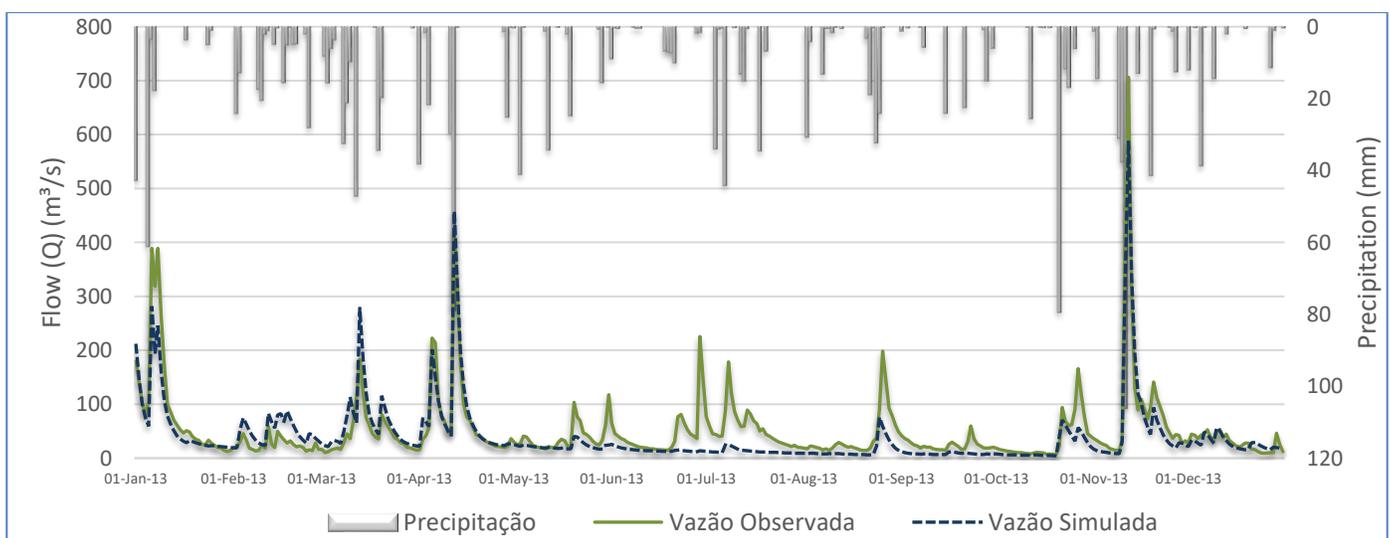


Figura 4 - Comparação de dados observados e simulados para o ano de 2013. (Fonte: Autores, 2024)

Nos anos seguintes, houve influência climática do El Niño resultando em elevados índices pluviométricos. Em 2014, um ano com alta precipitação (2444 mm) e COE de 0,53, apresentou-se dificuldades na modelagem, sendo considerado o ano de pior desempenho durante a calibração. No entanto, ainda foi considerado satisfatório pela literatura (GREEN e GRIESVEN, 2008). Já em 2015, também com alta precipitação (média anual de 2383 mm), o modelo mostrou maior consistência (COE=0,83) e melhor desempenho em comparação com outros períodos. A discrepância entre os anos, apesar de uma diferença de apenas 61 mm, pode ser atribuída à distribuição do regime pluviométrico. Em 2014, as chuvas foram mais difusas ao longo do ano, resultando em inúmeros picos de vazão (cerca de 15 eventos superiores a 200 m³/s), enquanto em 2015, os picos foram concentrados nos meses finais que foram bem simulados. A Figura 5 evidencia essa disparidade.

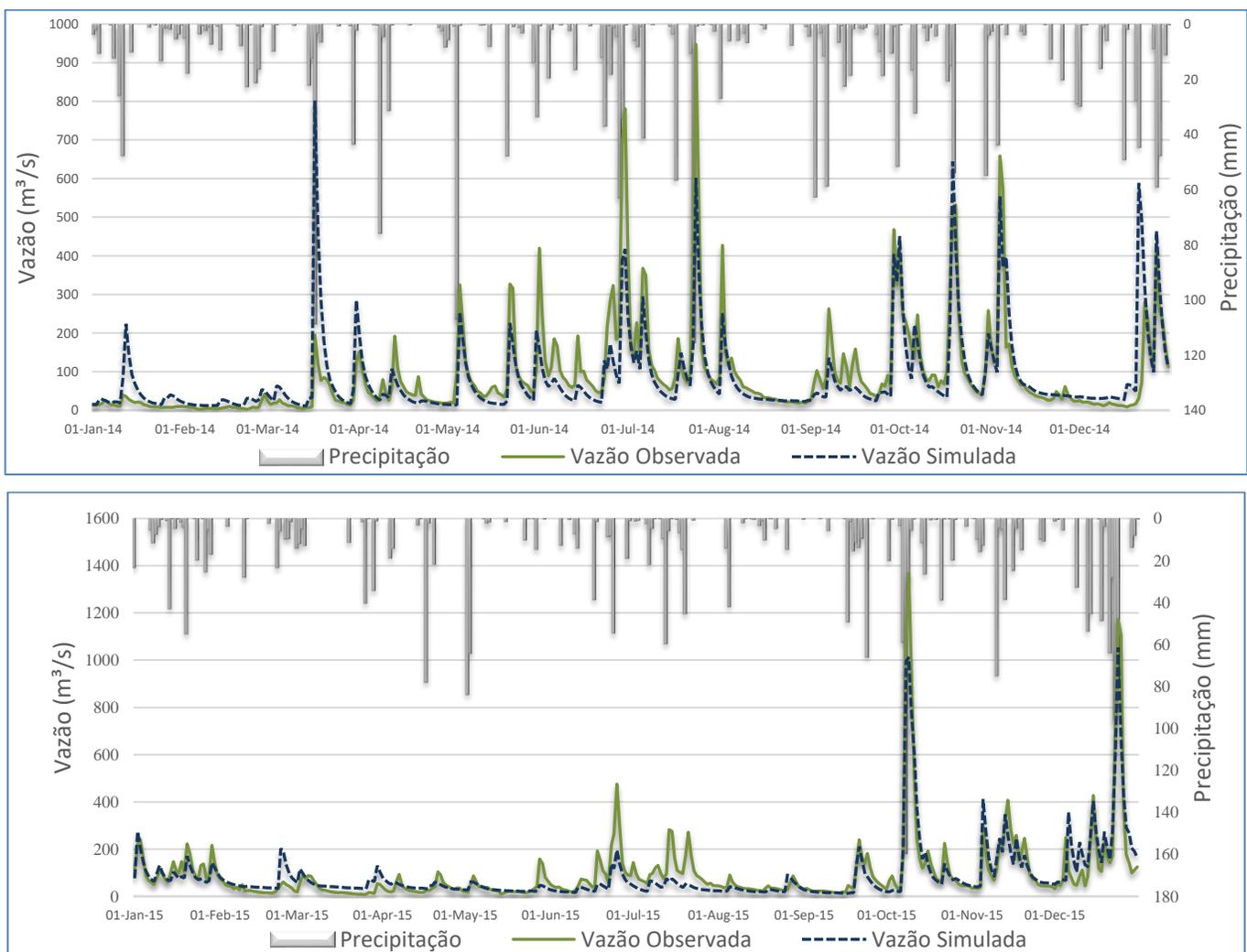


Figura 5 - Comparação de dados observados e simulados para o ano de 2014 e 2015. (Fonte: Autores, 2024)

Para o ano de 2016 (Figura 6), é interessante analisar a performance do modelo a partir de recortes temporais, o primeiro semestre deste ano superestimou o fluxo de base e subestimou a vazão de pico. Contudo, o segundo semestre desempenhou-se excelentemente a partir de outubro. Tem-se um COE = 0,23 e 0,88 para o primeiro e segundo semestre, respectivamente. Mas em sua totalidade, o ano de 2016 teve um COE = 0,78 e $r = 0,7$.

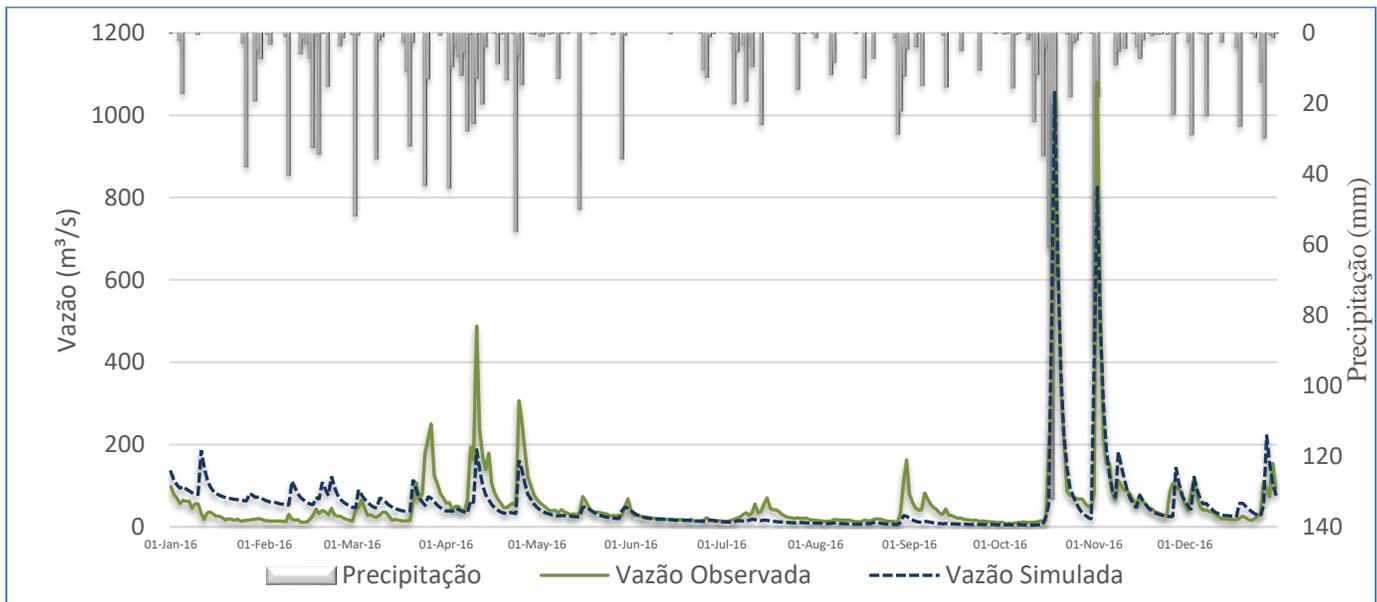


Figura 6 - Comparação de dados observados e simulados para o ano de 2016. (Fonte: Autores, 2024)

Após a calibração do modelo SWAT, a validação foi realizada para os anos de 2017 a 2019. A simulação para o ano de 2017 (Figura 7), por ter um PBIAS, muito próximo de zero indica que as previsões do modelo com os valores observados não possuem nenhuma tendenciosidade significativa o que acaba refletindo nas médias parecidas de dados simulados e observados.

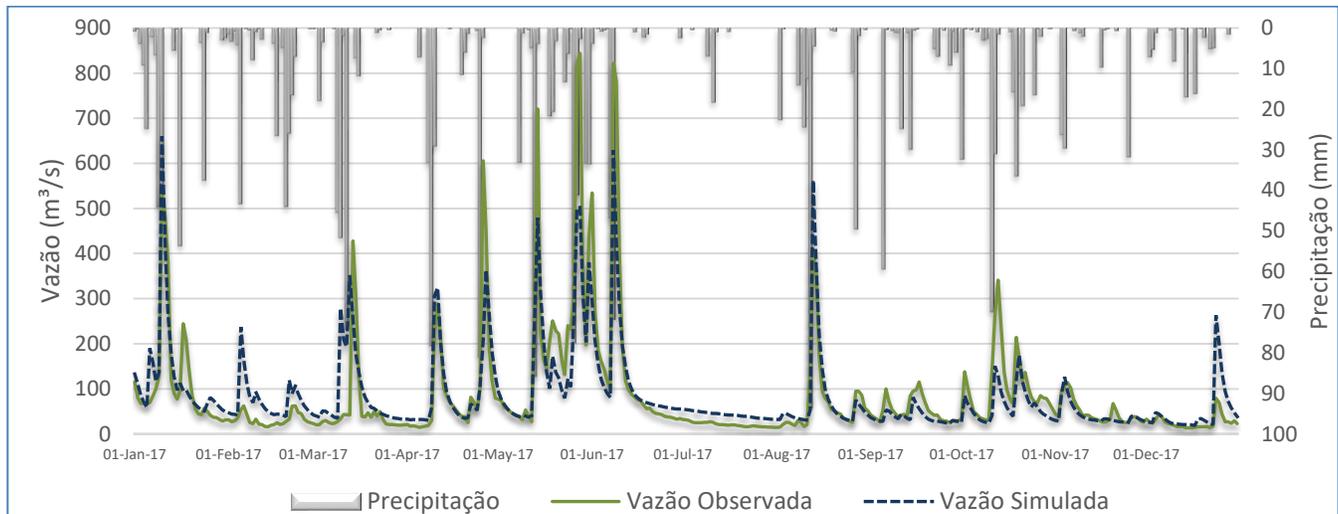


Figura 7 - Comparação de dados observados e simulados para o ano de 2017. (Fonte: Autores, 2024)

O pior ano de simulação durante os anos de validação (2017 a 2019) com $COE = 0,53$ e $r = 0,77$, foi 2018 (Figura 8) com resultados considerados insatisfatórios, principalmente quando ocorrem vazões menos intensas entre os meses de abril e julho, subestimando as mesmas.

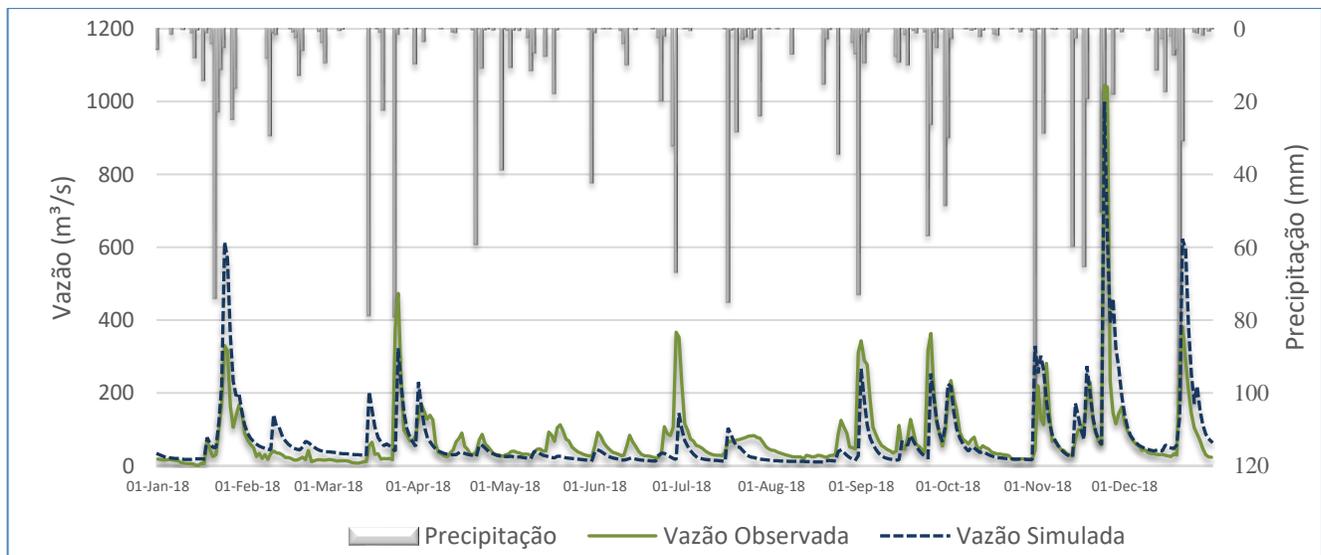


Figura 8 - Comparação de dados observados e simulados para o ano de 2018. (Fonte: Autores, 2024)

O último ano simulado com possibilidade de validação que é 2019, obteve o melhor desempenho dentre todo período simulado com $COE = 0,85$ e uma correlação muito forte ($r = 0,92$). O regime pluviométrico com pouca ocorrência de eventos extremos também pode ter influenciado nesse desempenho. Pode ser conferido pela Figura 9 que a partir do mês de novembro há um regime pluviométrico de baixa vazão em que o modelo

superestimou esse evento. Isso ocorre, pois, essa época foi caracterizada pela incidência do La Niña que se intensificou nos anos de 2020 e 2021.

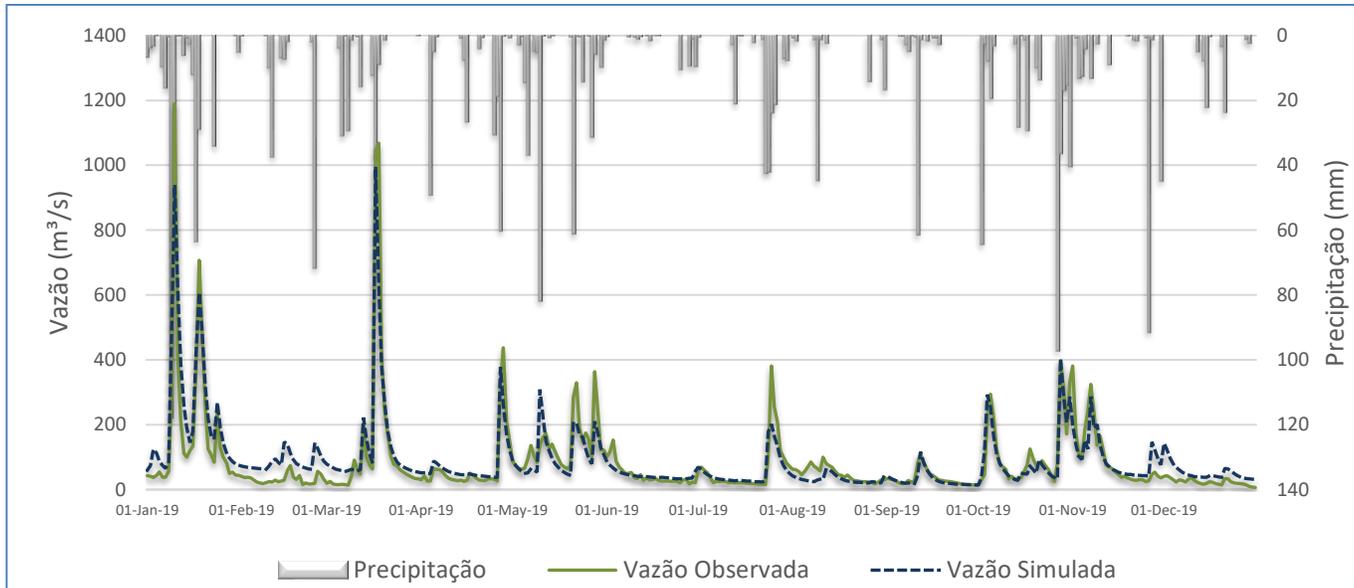


Figura 9 - Comparação de dados observados e simulados para o ano de 2019. (Fonte: Autores, 2024)

Balanço Hídrico do Cenário I

O primeiro cenário representa as condições recentes de uso e ocupação da terra. A análise dos componentes do balanço hídrico simulado pelo modelo SWAT em escala anual, indica que 47% da precipitação total (média de 2.050mm anuais) se transforma em escoamento nos cursos d'água e 45% da precipitação é destinada na evapotranspiração, o que inclui a evaporação da água da superfície do solo e a transpiração das plantas. Do fluxo total, 35% são provenientes do escoamento de base representado pela contribuição da água subterrânea para os cursos d'água como o escoamento subsuperficial e que 65% do fluxo total é composto pelo escoamento superficial. A fração da precipitação que se infiltra no solo (percolação), contribuindo para a recarga de água subterrânea é de 21% da chuva. E existe uma proporção muito pequena, cerca de 1%, da contribuição de precipitação para a recarga profunda do profunda do aquífero que é representado pelo Sistema Aquífero Guarani (SAG). A ilustração que representa os processos hidrológicos do balanço hídrico simulado pelo SWAT é encontrada na Figura 10.

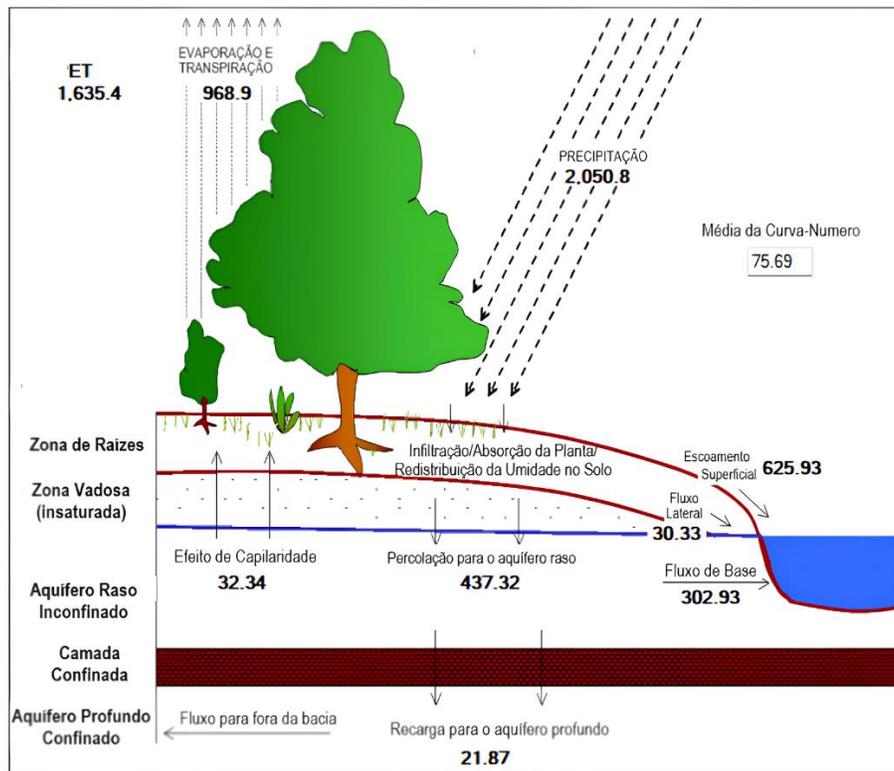


Figura 10 - Balanço Hídrico Anual do Cenário I em milímetros. (Fonte: Adaptado do SWAT)

Para a estimativa do escoamento superficial da BHRJ, utilizou-se o método Curva-Número (CN) desenvolvido pelo SCS (SOIL CONSERVATION SERVICE, 1957) na qual baseia-se na precipitação, classe hidrológica do solo e no uso e ocupação da terra. Com esses parâmetros já inseridos no modelo, obteve-se o valor de Curva-Número de 75,7. Os resultados do CN podem variar de 1 a 100 e quanto maior o resultado, maior a impermeabilidade da área o que potencializa o escoamento superficial. O valor CN de 75 estimado para a BHRJ, pode ser definido como um número de curva que representa a cobertura vegetal do tipo gramínea (campos/pastagens) em solos profundos com baixa taxa de infiltração como o Argissolo Vermelho (TUCCI, 2000; SARTORI, 2005). Essas definições representam as condições de solos e uso da terra que são predominantes na bacia o que traz coerência nos resultados calculados para o CN.

Balanço Hídrico do Cenário II

Com a inserção de um reflorestamento no mapeamento de uso e ocupação da terra em áreas que seriam destinadas a APP's nas margens de rios, a classe de mata nativa aumentou em 3,3% e fez com que o fluxo total da bacia aumentasse. A comparação da média de vazão simulada entre as condições de uso e ocupação da terra atuais (Cenário I) e o cenário alternativo de preservação de mata ciliar (Cenário II) são observadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Comparação dos resultados simulados de vazão (m³/s) em dois cenários hidrológicos

ANO	VAZÃO CENÁRIO I	VAZÃO CENÁRIO II
2013	39,5	53,4
2014	83,7	103
2015	87,1	100
2016	55,6	64,7
2017	84,3	94,6
2018	72,2	79,2
2019	89,6	100,3

Fonte: Autores, 2024).

A vazão do Rio Jaguari aumentou com a inserção de matas ciliares (Figura 11). A análise desse resultado pode gerar confusão pois muitas vezes se atribui o aumento de vazão em áreas de menor densidade vegetacional e sem manejo de conservação do solo que ocasionam no aumento do escoamento superficial, mas no caso, houve decréscimo nesse tipo de escoamento. Assim, ao analisar somente a vazão simulada, pode parecer que o efeito de conservação da mata ciliar seja similar ao que ocorre quando há retirada de cobertura vegetal. Por isso a importância da avaliação integral dos resultados do balanço hídrico que a modelagem fornece. Oliveira (2023) alcançou resultados semelhantes ao desse trabalho com elevações das vazões médias simuladas nos cenários de reflorestamento a partir da diminuição do escoamento superficial e aumento do escoamento subterrâneo (de base).

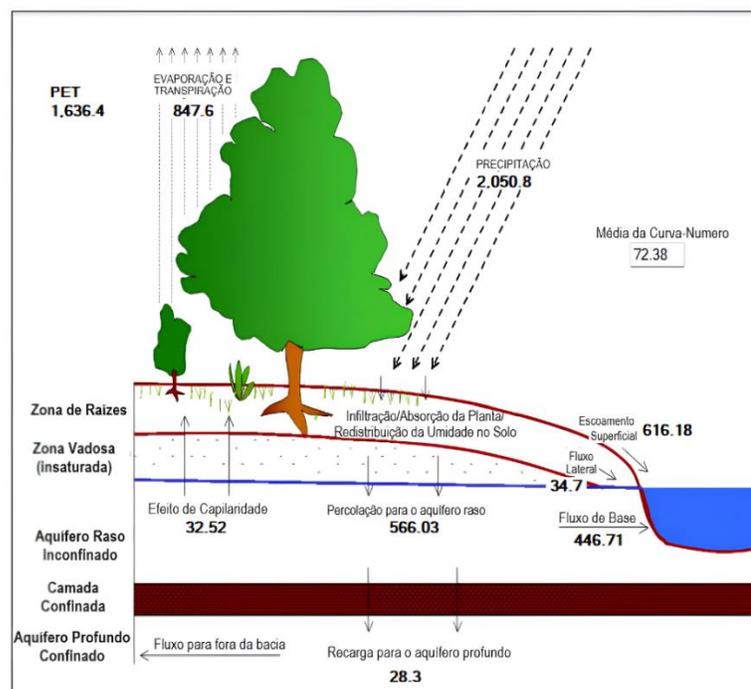


Figura 11 - Balanço Hídrico Anual do Cenário II em milímetros. (Fonte: Adaptado do SWAT)

Observa-se um conjunto de mudanças no balanço hídrico da bacia em contraposição ao cenário I de uso e ocupação da terra nas condições atuais. Houve redução no escoamento superficial, porém com aumento no escoamento subsuperficial e no escoamento de base, com ênfase a esse último que obteve aumento de 9 pontos percentuais resultando na maior vazão simulada. O armazenamento de água subterrânea foi superior ao cenário I, com um acréscimo para a recarga ao aquífero a partir de uma maior percolação em relação a precipitação (7 pontos percentuais). A redução do CN médio para a bacia em 72 já indica o maior coeficiente de infiltração.

Destaca-se que a evapotranspiração média anual diminuiu 5 pontos percentuais. Em princípio o resultado esperado era de que o reverso ocorresse, devido a maior presença de vegetação que contribui para a transpiração da água. Porém, muitas áreas em que há conflito de uso da terra em APP's, são locais que foram cultivados lavouras de arroz onde é demandado que haja irrigação formando lâminas de água nas lavouras contribuindo para a evapotranspiração. Ao realizar a inserção de matas ciliares para a modelagem do cenário alternativo, a redução da rizicultura pode ter contribuído para a diminuição dos valores de evapotranspiração. Scariot (2022) corrobora com isso constatando, através da modelagem, que regiões onde ocorrem os plantios sistematizados de arroz irrigado são as que mais contribuem com as saídas de água da superfície para a atmosfera.

Ao simular cenários alternativos, Rodrigues (2015) também obteve redução na evapotranspiração no cenário de preservação de mata nativa em relação ao uso atual em uma bacia do Rio Pará. Os valores de evapotranspiração somente aumentaram ao simular um cenário de reflorestamento intenso, igualmente ocorreu com Oliveira (2023).

Em síntese, o cenário alternativo para a BHRJ apesar da pouca diferença na informação cartográfica inserida, foi o suficiente para ser perceptível as alterações no balanço hídrico com destaque no maior armazenamento de água subterrânea que flui para os rios e é essencial para o abastecimento de longo prazo da água responsável por manter o nível de base dos cursos hídricos durante períodos de estiagem causados principalmente pelo fenômeno La Niña. Isso reforça a importância da manutenção e preservação de matas ciliares como é previsto pela legislação atual.

IV. CONCLUSÕES

O desenvolvimento de trabalhos relacionadas aos recursos hídricos são essenciais para a análise de impactos socioambientais decorrentes de mudanças climáticas e práticas inadequadas de uso da terra. Nesse

contexto, os modelos hidrológicos desempenham um papel importante que podem oferecer contribuições para a gestão de bacias hidrográficas por meio da simulação dos componentes do balanço hídrico.

A simulação hidrológica com calibração manual permitiu atingir bons resultados, considerados pela literatura com o desempenho para a calibração de $COE = 0,74$ e $r = 0,86$ e para o período de validação $COE = 0,72$ e $r = 0,85$. Isso demonstra que a aplicação do modelo SWAT em áreas de estudo com pouco monitoramento e/ou escassez de dados confiáveis de informações hidrometeorológicas pode se bastar através da utilização de fontes alternativas como os dados meteorológicos de reanálise.

Ao avaliar a modelagem hidrológica com um cenário sintético de uso da terra que visa a conservação das matas ciliares, a vazão média do Rio Jaguari aumentou a partir da intensificação do armazenamento de água subterrânea e do escoamento de base. Isso demonstra o importante papel de serviços ambientais que mesmo a alteração de pequenas áreas associadas a APP's podem gerar mudanças significativas no balanço hídrico de uma bacia hidrográfica.

Por fim, recomenda-se o fomento em pesquisas e práticas com aplicações de modelos hidrológicos que podem servir como um bom aparato na compreensão e predição de impactos socioambientais e que se relacionam com os eventos extremos em bacias hidrográficas que estão se tornando cada vez mais recorrentes. Mas para isso é necessário que os órgãos responsáveis qualifiquem o monitoramento e métodos para levantamento de dados.

Agradecimentos

Agradecimentos especiais a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo fomento financeiro.

V. REFERÊNCIAS

ADRIOLO, M. V.; SANTOS, I.; GIBERTONI, R. C.; CAMARGO, A. S. G. Calibração do modelo SWAT para a produção e transporte de sedimentos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE PEQUENAS E MÉDIAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS, 6, 2008, Belo Horizonte. Anais [...]. Belo Horizonte: Comitê Brasileiro de Barragens, 2008.

ANACHE, J. A. A. Alterações no ciclo hidrológico e na perda de solo devido aos diferentes usos do solo e variações climáticas em área de Cerrado. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2017.

ANDRADE, M. A.; MELLO, C. R.; BESKOW, S. Simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica representativa dos Latossolos na região Alto Rio Grande, MG. Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental, v. 17, p. 69-76, 2013.

- BALTOKOSKI, V. et al. Calibração de modelo para a simulação de vazão e de fósforo total nas sub-bacias dos Rios Conrado e Pinheiro-Pato Branco (PR). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 34, p. 253-261, 2010.
- BLAINSKI, É.; PORRAS, E. A. A.; GARBOSSA, L. H. P.; PINHEIRO, A. Simulation of land use scenarios in the Camboriú River Basin using the SWAT model. *RBRH*, v. 22, 2017.
- BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de Maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/112651.html. Acesso em: 18 abr. 2022
- BRIGHENTI, T. M.; BONUMA, N. B.; CHAFFE, P. L. B.; GRISON, F.; Kobiyama, M. Análise de sensibilidade como primeiro passo para modelagem hidrológica: Estudo de caso do o modelo SWAT. *Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (22.: Florianópolis, 2017)*. Anais [recurso eletrônico]. [Porto Alegre: ABRH, 2017], 2017.
- BOTELHO, R. G. M.; SILVA, A. D. Bacia hidrográfica e qualidade ambiental. Reflexões sobre a geografia física no Brasil. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, p. 153-192, 2004.
- COELHO NETTO, A. L. Hidrologia de encosta na interface com a geomorfologia. *Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos*, v. 2, p. 93-148, 1995.
- COLEÇÃO, MapBiomias. da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso do Solo do Brasil. 2022. 7.
- COHEN, J. C. P.; BELTRÃO, J. D. C.; GANDU, A. W.; SILVA, R. R. D. Influência do desmatamento sobre o ciclo hidrológico na Amazônia. *Ciência e Cultura*, v. 59, n. 3, p. 36-39, 2007.
- FONTANA, D. C.; BERLATO, M. A. Influência do El Niño Oscilação Sul sobre a precipitação pluvial no estado do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria*, v. 5, n. 1, p. 127-132, 1997.
- FRITZEN, M.; BINDA, A. L. Alterações no ciclo hidrológico em áreas urbanas: cidade, hidrologia e impactos no ambiente. *Ateliê Geográfico*, v. 5, n. 3, p. 239-254, 2011.
- GHAFFARI, G.; KEESSTRA, S.; GHODOUSI, J.; AHMADI, H. SWAT-simulated hydrological impact of land-use change in the Zanjnrood basin, Northwest Iran. *Hydrological Processes: An International Journal*, v. 24, n. 7, p. 892-903, 2010.
- GHIMIRE, U.; AKHTAR, T.; SHRESTHA, N. K.; PAUL, P. K.; SCHURZ, C.; SRINIVASAN, R.; DAGGUPATI, P. A long-term global comparison of IMERG and CFSR with surface precipitation stations. *Water Resources Management*, v. 36, n. 14, p. 5695-5709, 2022.
- GREEN, C. H.; GRIENSVEN, A. V. Autocalibration in hydrologic modeling: Using SWAT2005 in small-scale watersheds. *Environmental Modelling and Software*, v. 23, p. 422-434, 2008.
- GROISMAN, P. Y. KNIGHT, R. W.; EASTERLING, D. R.; KARL, T. R.; HEGERL, G. C.; RAZUVAEV, V. N. 2005: Trends in intense precipitation in the climate record. *Journal of Climate*, 18, 1326-1350.
- HUFFMAN, G. J.; BOLVIN, D. T.; NELKIN, E. J.; TAN, J. Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG) technical documentation. Nasa/Gsfc Code, v. 612, n. 47, p. 2019, 2015.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e estatística. Mapa exploratório de solos do estado do Rio Grande do Sul. Rio de Janeiro: IBGE. Disponível em: <https://mapas.ibge.gov.br/>. 2002.
- LELIS, T. A.; CALIJURI, M. L. SANTIAGO, A. da F.; LIMA, D. C. de; ROCHA, E. de O. Análise de sensibilidade e calibração do modelo SWAT aplicado em bacia hidrográfica da região sudeste do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 36, n. 2, p. 623-634, 2012.

LETA, O. T.; NOSSENT, J.; VELEZ, C.; SHRESTHA, N. K.; VAN GRIENSVEN, A.; BAUWENS, W. Assessment of the different sources of uncertainty in a SWAT model of the River Senne (Belgium). *Environmental Modelling & Software*, v. 68, p. 129-146, 2015.

MACHADO, R. E.; VETORAZZI, C. A.; XAVIER, A. C. Simulação de cenários alternativos de uso da terra em uma microbacia utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 27, p. 727-733, 2003.

MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A.; TOMASELLA, J.; OYAMA, M. D.; DE OLIVEIRA, G. S.; DE OLIVEIRA, R.; CAMARGO, H.; ALVES, L. M.; BROWN, I. F. The drought of Amazonia in 2005. *Journal of Climate*, v. 21, p. 495-516. 2008.

MARCON, I. R. Modelagem e cenários hidrológicos em bacia representativa da mata Atlântica no sul do Brasil. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Maria. 2013.

MARTINS, L. L.; MARTINS, W. A.; MORAES, J. F. L.; JÚNIOR, M. J. P.; MARIA, I. C. Calibração hidrológica do modelo SWAT em bacia hidrográfica caracterizada pela expansão do cultivo da cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 13, n. 2, p. 576-594, 2020.

MEDEIROS, I. C.; DA SILVA, R. M. Análise da erosão hídrica na região semiárida da Paraíba usando o modelo SWAT acoplado a um SIG. *Geosciences= Geociências*, v. 33, n. 3, p. 457-471, 2014.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA. Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Estado do Rio Grande do Sul. Departamento Nacional de Pesquisa Agropecuária/ Divisão de Pesquisa Pedológico - Boletim Técnico N.º30. 1973.

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J. R. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation, Version 2009. Texas, Texas: Grassland, Soil and Water Research Laboratory - Agricultural Experiment Station. Texas Water Resources Institute. 2011. 618p.

NUNES, F. M. S.; SRINIVASAN, V. S.; DE ARAGÃO, R.; DE BRITO, Y. M. A. Proposição de uma metodologia de avaliação hidrossedimentológica e de sensibilidade de parâmetros através do modelo SWAT. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales. Investigación, desarrollo y práctica*, p. 1220-1239. 2022.

OLIVEIRA, T. H. D. Impacto das mudanças da cobertura e uso da terra nos processos hidrológicos da bacia do Rio Pojuca, Bahia, Brasil. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (ProfÁgua). Universidade Federal da Bahia. 2023.

PASSOS, F. O.; SILVA, B. C.; SILVA, F. G. B. Avaliação de impactos de mudanças no uso e manejo do solo sobre as vazões da Bacia Hidrográfica do Ribeirão José Pereira, utilizando o modelo SWAT. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 14, n. 02, p. 619-633, 2021.

PBMC. Contribuição do Grupo de Trabalho 2 ao Primeiro Relatório de Avaliação Nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. Sumário Executivo do GT2. PBMC, Rio de Janeiro, Brasil. 28 p, 2013b.

PINHEIRO, A.; TEIXEIRA, L. P.; KAUFMANN, V. Capacidade de infiltração de água em solos sob diferentes usos e práticas de manejo agrícola. *Ambiente & Água-An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, v. 4, n. 2, p. 188-199, 2009.

PISINARAS, V. Hydrological and water quality modeling in a medium-sized basin using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT). *Desalination*, v. 250, n. 1, p. 274-286, 2010.

POLIDORO, J. C.; MENDONÇA-SANTOS, M. de L.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; CARVALHO FILHO, A. de; MOTTA, P. E. F. da; CARVALHO JUNIOR, W. de; ARAUJO FILHO, J. C. de; CURCIO, G. R.; CORREIA, J. R.; MARTINS,

- E. de S.; SPERA, S. T.; OLIVEIRA, S. R. de; M.; BOLFE, E. L.; C. V.; TOSTO, S. G.; VENTURIERI, A.; SA, I. B.; OLIVEIRA, V. A. de; ... DART, R. de O. Programa Nacional de Solos do Brasil (PronaSolos). EMBRAPA. <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1054924/programa-nacional-de-solos-do-brasil-pronasolos>. 2016.
- RODRIGUES, E. L.; ELMIRO, M. A. T.; JACOBI, C. M.; LAMOUNIER, W. L. Aplicação do Modelo SWAT na avaliação do consumo de água em áreas de florestas plantadas na bacia do rio Pará, Alto São Francisco, em Minas Gerais. *Sociedade & Natureza*, v. 27, p. 485-500, 2015.
- SALLES, L. A. Calibração e validação do modelo SWAT para a predição de vazões na bacia do Ribeirão Pípiripau. 2012.
- SCARIOT, N. Avaliação da aplicabilidade do modelo SWAT na bacia hidrográfica do rio Ibicuí. Trabalho de Conclusão de Curso. Curso de Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Maria. 2023.
- SOUZA, R. M.; SANTOS, I. Estimativa da variabilidade espacial de vazões mínimas na Bacia Hidrográfica do Altíssimo Rio Negro, Região Sul-Brasileira, com aplicação do modelo SWAT. *RA'EGA* 28, p.134-153. 2013.
- SARTORI, A.; LOMBARDI NETO, F.; GENOVEZ, A. M. Classificação hidrológica de solos brasileiros para a estimativa da chuva excedente com o método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 10, n. 4, p. 05-18, 2005.
- SETEGN, S. G.; SRINIVASAN, R.; DARGAHI, B. Hydrological modelling in the Lake Tana Basin, Ethiopia using SWAT model. *The Open Hydrology Journal*, v. 2, n. 1, 2008.
- SHARPLEY, A. N.; WILLIAMS, J. R. Erosion/productivity impact calculator. Model documentation. Washington, D.C: USDAARS Technical, 235p. Bulletin 1768. 1990.
- SILVA, C. A. I. Análise de aplicabilidade da interface do modelo hidrológico Swat-sig no estudo da produção de sedimentos em uma bacia no Nordeste do Brasil. 2019. 52 Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) – Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2014.
- SANTOS, V. S. Zoneamento geoambiental da bacia hidrográfica do rio Jaguari–oeste do RS. Universidade Federal de Santa Maria. Programa de Pós-Graduação em Geografia. Dissertação de Mestrado. 2018.
- SOUSA, W. S. Uso do modelo SWAT para avaliar os impactos das mudanças climáticas nos recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Una-PE. Doutorado em Meteorologia. Universidade Federal de Campina Grande. 2019.
- SOUZA, V. S.; NUNES, M. L. A.; FILHO, O. C. R. Sensibilidade dos Parâmetros Hidrossedimentológicos do Modelo SWAT em uma bacia do Rio Machadinho/RO. XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. 2015.
- SPERA, S. A.; GALFORD, G. L.; COE, M. T.; MACEDO, M. N.; MUSTARD, J. F. Land-use change affects water recycling in Brazil's last agricultural frontier. *Global change biology*, v. 22, n. 10, p. 3405-3413, 2016.
- STERLING, S. M.; DUCHARNE, A.; POLCHER, J. The impact of global land-cover change on the terrestrial water cycle. *Nature Climate Change*, v. 3, n. 4, p. 385-390, 2013.
- TRENTIN, R.; LAURENT, F.; ROBAINA, L. E. S. Vazão e Balanço Hídrico Relacionado a Mudanças no Uso da Terra em uma Bacia Hidrográfica de Médio Porte no Bioma Pampa do Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 16, n. 02, p. 873-893, 2023.
- TUCCI, C. E. M. Modelos Hidrológicos. Porto Alegre, Editora da UFRGS, 2000. 669p.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). Shuttle Radar Topography Mission - SRTM. Resolução espacial de 30 metros. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: 23 de março de 2023.

VALÉRIO, E. L. S.; FRAGOSO JUNIOR, C. R. Avaliação dos efeitos de mudanças climáticas no regime hidrológico da bacia do rio Paraguaçu, BA. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 20, n. 4, p. 872-887, 2015.

VAN GRIENSVEN, A.; MEIXNER, T.; GRUNWALD, S.; BISHOP, T.; DILUZIO, M., & SRINIVASAN, R. A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi variable catchment models. Journal of hydrology, v. 324, n. 1-4, p. 10-23, 2006.
