



Revista Brasileira de Geografia Física

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



Técnica de calibração para modelagem da bacia hidrográfica do Rio São Francisco, Brasil, utilizando o SWAT

Carolyne Wanessa Lins de Andrade Farias¹, Jussara Freire de Souza Viana², Rodrigo de Queiroga Miranda³, Samara Fernanda da Silva⁴, Gabriel Vasco⁵, Suzana Maria Gico Lima Montenegro², Josiclêda Domiciano Galvinctio²

Universidade Federal da Paraíba¹ Universidade Federal de Pernambuco² University of Guelph³ Universidade Federal do Oeste da Bahia⁴ Universidade Federal Rural de Pernambuco⁵

Artigo recebido em 09/05/2023 e aceito em 12/06/2023.

RESUMO

O Soil and Water Assessment Tool (SWAT) é um modelo hidrossedimentológico que tem como foco principal avaliar os impactos das modificações no uso do solo sobre a qualidade e quantidade de água em bacias hidrográficas. Para que essas avaliações sejam adequadas, considerando a representatividade dos processos simulados pelo modelo, faz-se necessário a realização do procedimento de calibração. Muitos modeladores encontram grande desafio nesta etapa imprescindível da modelagem. Há uma grande variedade de parâmetros a serem considerados, diferentes algoritmos, bem como diferentes funções objetivas. Outro aspecto a ser destacado é o fato de que o tempo de processamento pode ser alto, quando se considera bacias hidrográficas representativas, como é o caso da bacia hidrográfica do Rio São Francisco, Brasil (639.219km²). Para atender a demanda de criação de um modelo de gestão integrada de águas para países BIS (Brasil, Índia e África do Sul) sob cenários de mudanças climáticas, a bacia do São Francisco foi calibrada. Esta nota científica objetiva fornecer uma visão do procedimento de calibração e confiabilidade do modelo, utilizando dados de vazão em tempo mensal no período de 1961 a 2016 para a bacia do São Francisco. O modelo SWAT calibrado para a bacia do Rio São Francisco pode ser utilizado para análises de cenários de mudanças climáticas e seus impactos sobre a disponibilidade hídrica da bacia, subsidiando assim, a tomada de decisão sobre os recursos hídricos, e a criação do modelo de gestão integrada com os demais países do BIS.

Palavras-chave: modelagem hidrológica, SWAT-CUP, BIS

Calibration technique for modeling the São Francisco watershed, Brazil, using SWAT

ABSTRACT

The Soil and Water Assessment Tool (SWAT) is a hydrosedimentological model whose main focus is to evaluate the impacts of changes in land use on the quality and quantity of water in watersheds. For these evaluations to be adequate, considering the representativeness of the processes simulated by the model, it is necessary to carry out the calibration procedure. Many modelers find a great challenge in this essential stage of modelling. There are a wide variety of parameters to consider, different algorithms, as well as different objective functions. Another aspect to be highlighted is the fact that the processing time can be high, when considering representative watersheds, as is the case of the São Francisco River basin, Brazil (639,219 km²). To meet the demand for the creation of an integrated water management model for BIS countries (Brazil, India and South Africa) under climate change scenarios, the São Francisco basin was calibrated. This scientific note aims to provide an overview of the calibration procedure using flow data in a monthly time step from 1961 to 2016 in the studied basin. The SWAT model calibrated for the São Francisco River basin can be used to analyze climate change scenarios and their impacts on the water availability of the basin, thus supporting decision-making on water resources and the creation of a management model. integrated with the other BIS countries.

Keywords: hydrological modeling, SWAT-CUP, BIS.

Introdução

O entendimento de variáveis que compõem o ciclo hidrológico, como vazão e produção de sedimentos, é essencial para lidar com os desafios de planejamento e gestão dos recursos hídricos (Brighenti et al., 2019), especialmente em bacias hidrográficas representativas como a bacia do Rio São Francisco (639.219 km²), que compõe uma das 12 regiões hidrográficas do território brasileiro, e se apresenta, segundo dados do Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (CBHSF), como uma região marcada por grande contraste, com áreas de elevados níveis de riqueza e densidade demográfica e outras com reduzidos níveis de renda e densidade populacional. Além disso, mais da metade da bacia (54%) pertence ao semiárido, o qual é marcado pela ocorrência de longos períodos de estiagem, exercendo assim, imensa pressão sobre os recursos hídricos.

Tais pressões poderão se intensificar ainda mais, com os efeitos previstos das mudanças climáticas. Segundo dados do Sexto Relatório do IPCC (2021), os impactos das mudanças climáticas se tornarão mais intensos, com destaque para o aumento da frequência de eventos extremos, incluindo as secas. Os eventos de seca tendem a aumentar no semiárido, com redução de 22% na precipitação e aumento da temperatura do ar em até 6,7 °C até o final do século XXI.

Sob o ponto de vista de gestão, acordos de cooperação entre países visando o desenvolvimento de estratégias de proteção às águas são primordiais. Dentro deste contexto, Índia, Brasil e África do Sul, três dos cinco países parceiros no BRICS, têm em comum os desafios relacionados aos problemas de escassez hídrica, que podem ser agravados com as alterações do clima. Assim, para atender a demanda de criação de um modelo de gestão integrada de águas para países pertencentes ao BRICS sob cenários de mudanças climáticas, uma proposta de projeto conjunta entre esses países foi criada, envolvendo três diferentes bacias hidrográficas: *Munneru* (Índia), *São Francisco* (Brasil) e *Rietspruit* (África do Sul).

Modelos hidrológicos se apresentam como ferramentas valiosas para compreensão da dinâmica hidrológica e para analisar as potencialidades hídricas de uma bacia. O *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) é um modelo hidrossedimentológico que tem como foco principal avaliar os impactos das modificações no uso do solo sobre a qualidade e quantidade de água em bacias hidrográficas (Arnold

et al., 2012), e têm sido aplicado em diversos estudos no Brasil envolvendo análises de variáveis como vazão e umidade do solo (Andrade et al., 2018), evapotranspiração (Lins et al., 2021); precipitação e temperatura (Andrade et al., 2020); e produção de sedimentos (Viana et al., 2019). Independentemente da aplicação, modelos hidrológicos como o SWAT necessitam passar pelo procedimento de calibração para tornarem-se aptos à produção de simulações seguras. Existem diferentes formas de calibração uma delas é pelo processo de paralelização, (Queiroga et al., 2017). Em bacias hidrográficas muito grande como a do rio São Francisco o processo de paralelização é muito importante para que a calibração e simulação do modelo se torne mais rápido.

No SWAT, o procedimento de calibração é realizado por meio do *SWAT Calibration and Uncertainty Programs* (SWAT-CUP). O SWAT-CUP é um software independente desenvolvido para análises de sensibilidade, calibração e validação e análises de incerteza baseadas em simulações SWAT. O programa compreende cinco procedimentos de calibração (SUFI-2, PSO, GLUE, ParaSol e MCMC), onze funções de objetivo (mult, sum, R2, chi2, NS, br2, ssqr, PBIAS, KGE, RSR, MNS) e inclui aplicativos como como visualização da área de estudo (Abbaspour et al., 2018).

Dentro deste contexto, a bacia do Rio São Francisco, Brasil, foi calibrada e o procedimento realizado será aqui apresentado. Esta nota científica objetiva fornecer uma visão do procedimento de calibração utilizando dados de vazão em passo de tempo mensal no período de 1961 a 2016 na bacia estudada.

Material e métodos

Área de estudo

A área de estudo compreende a bacia hidrográfica do Rio São Francisco, a qual abrange 639.219 km², correspondente a 8% do território brasileiro (Figura 1). Segundo dados do Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (CBHSF), a nascente da bacia encontra-se no estado de Minas Gerais, e o seu exutório no Oceano Atlântico, na divisa dos estados de Alagoas e de Sergipe. Essa grande abrangência integra as regiões Nordeste e Sudeste do país, totalizando 505 municípios, em seis estados (Minas Gerais, Goiás, Bahia, Pernambuco, Alagoas e Sergipe), além do Distrito Federal. A bacia foi dividida, para fins de planejamento, em quatro zonas ou regiões fisiográficas: Alto (92,6% Minas

Gerais, 5,6% Bahia, 1,2% Goiás, 0,5% Distrito Federal), Médio (100,0% Bahia), Submédio (59,4% Pernambuco, 39,5% Bahia, 1,1% Alagoas) e Baixo São Francisco (43,9% Alagoas, 23,8% Sergipe, 22,8% Pernambuco, 9,5% Bahia).

A bacia hidrográfica do Rio São Francisco possui uma população que ultrapassa os 15 milhões de habitantes, sendo a maior concentração demográfica localizada no Alto São Francisco. Há grande contraste na região, onde existem áreas com elevados níveis de riqueza e densidade demográfica e outras com reduzidos níveis de renda e densidade populacional.

O clima regional apresenta uma variabilidade associada à transição do úmido para o árido, com temperatura média anual variando de 18

a 27° C. A precipitação média anual é de 1.036 mm com o trimestre mais chuvoso de novembro a janeiro, contribuindo com 55 a 60% de toda a precipitação do ano, enquanto o período mais seco é de junho a agosto. A evapotranspiração média é de 896 mm/ano.

Em relação aos biomas, há grande diversidade, com presença de Caatinga, Cerrado, fragmentos de Mata Atlântica, além do ecossistema estuarino do rio. Entre os principais reservatórios existentes no rio São Francisco, pode-se citar o Três Marias, em Minas Gerais, Sobradinho, Paulo Afonso e Itaparica, na Bahia e Xingó, localizado entre os estados de Alagoas e Sergipe.

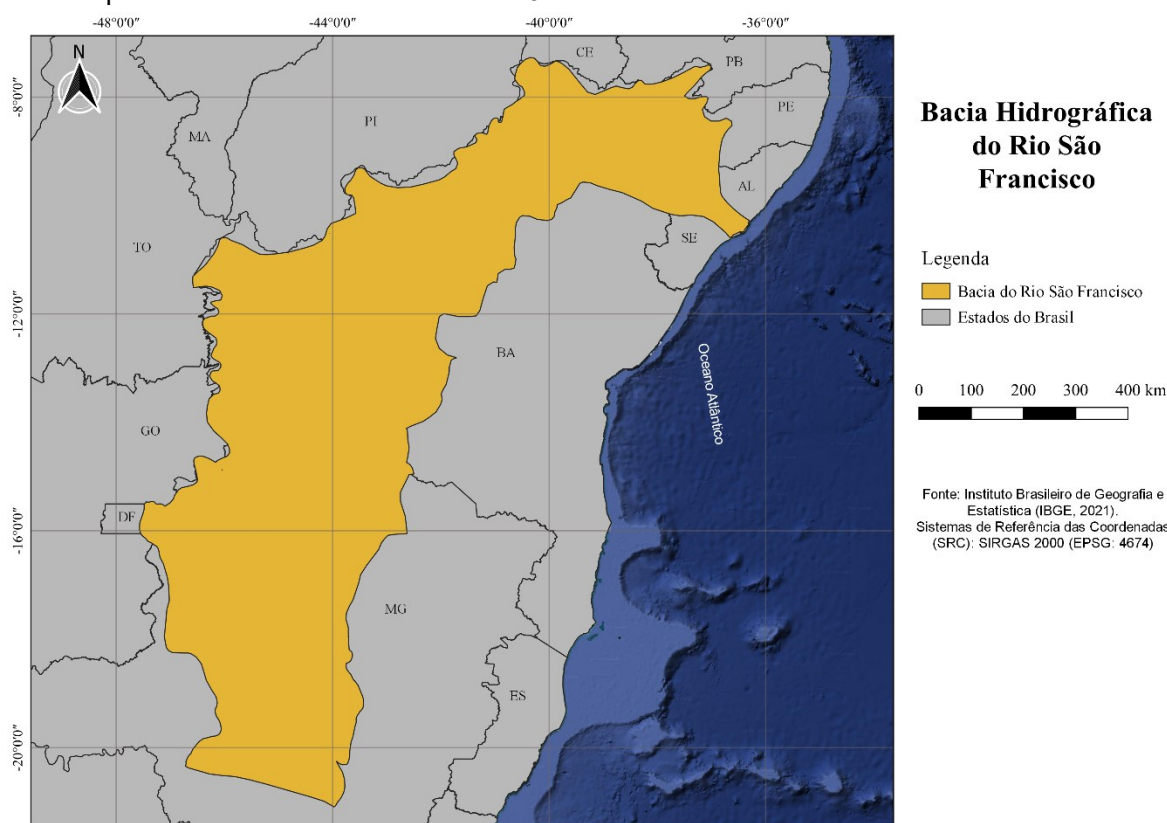


Figura 1. Mapa de localização da bacia hidrográfica do Rio São Francisco, Brasil

Procedimento de calibração do modelo SWAT

Neste estudo, o procedimento de calibração foi realizado no SWAT-CUP utilizando o algoritmo Sequential Uncertainty Fitting (SUFI-2). Adicionalmente, o coeficiente de eficiência (NS) do modelo de Nash–Sutcliffe foi usado como função objetivo.

A calibração ocorreu considerando uma das saídas do modelo: dados de vazão (1961-2016), sendo os primeiros cinco anos destinados ao

aquecimento do modelo. Tal calibração também foi realizada pelo método multi-site simultânea, na qual consistiu em usar dados de fluxo de todas as estações fluviométricas para calibrar o modelo alterando e otimizando os parâmetros de todas as sub-bacias ao mesmo tempo (Nkiaka et al., 2018); e o intervalo de tempo considerado ocorreu a nível mensal. Os dados de vazão foram obtidos através da Agência Nacional de Águas do Brasil (ANA) (<http://hidroweb.ana.gov.br/>).

Para avaliar o desempenho da calibração, foi utilizado o coeficiente de determinação (r^2), a eficiência do modelo de Nash–Sutcliffe (NS) e o percentual de tendência (PBIAS). Segundo Abbaspour et al. (2004), um modelo é considerado calibrado satisfatoriamente pelo SUFI-2 quando r^2 é maior que 0,80. O NS varia entre infinito negativo e 1,0 (o valor ideal). Valores entre 0 e 1 são geralmente considerados níveis de desempenho aceitáveis e valores < 0 indicam que é melhor usar a média dos dados observados do que o valor previsto do modelo (Nash e Sutcliffe, 1970). Moriasi et al. (2007) apresentam a seguinte classificação para o coeficiente NS, considerando simulações mensais: $0,75 < NS < 1,00$ o modelo é considerado muito bom; $0,65 < NS < 0,75$ o modelo é considerado bom; entre 0,50 e 0,65 satisfatório; e abaixo de 0,50 inadequado. O PBIAS mede a tendência média (em percentual) dos valores simulados serem maiores ou menores do que os dados observados, sendo o seu valor ótimo igual a 0, com magnitudes baixas indicando boa precisão na simulação do modelo. Valores positivos indicam subestimação pelo modelo e valores negativos indicam superestimação (Gupta et al., 1999). Van Liew et al. (2007) apresentam a seguinte classificação para este coeficiente em aplicações do modelo SWAT: $|PBIAS| < 10\%$, muito bom; $10\% < |PBIAS| < 15\%$, bom; $15\% < |PBIAS| < 25\%$, satisfatório; $|PBIAS| > 25\%$, o modelo está inadequado.

Parametrização e simulações no SWAT-CUP

Na Tabela 1 são apresentados os 17 parâmetros utilizados na calibração a nível mensal da bacia hidrográfica do Rio São Francisco (região sub-média), sendo descrito os intervalos padrão do modelo, os valores mínimo e máximo adotados, bem como valores ajustados obtidos nas melhores simulações do modelo SWAT.

A letra no início do nome dos parâmetros indica o tipo de operador adotado pelo SWAT-CUP durante o processo de calibração, sendo: R (relative) V (replace) ou ainda A (absolute). Assim, se o operador for do tipo "V" (replace), o programa substitui o valor do parâmetro resultante da melhor simulação da iteração anterior por um novo valor (dentro da faixa de variação mínima e máxima adotada pelo usuário). Enquanto que, se o parâmetro for utilizado com o operador "R" (relative), o SWAT-

CUP multiplica o valor do parâmetro resultante da melhor simulação da iteração anterior por um novo valor (também dentro da faixa de variação mínima e máxima adotada pelo usuário). Para o método "A" (absolute), soma-se um valor (dentro da faixa de variação) ao valor do parâmetro resultante da melhor simulação da iteração anterior. A partir dos novos valores dos parâmetros, procede-se uma nova iteração, buscando a maximização das estatísticas utilizadas para avaliar o desempenho da simulação, como o Nash-Sutcliffe (NS) e o PBIAS (Bueno et al., 2017). Para a presente aplicação, foram realizadas 20 simulações e um único processo iterativo, uma vez que a grande área da bacia traz limitações quanto ao tempo de processamento. Entretanto, valores aceitáveis foram encontrados nestas simulações, com a melhor simulação sendo a de número 19.

De maneira geral, parâmetros relacionados à água subterrânea e às características dos solos foram os mais adotados, representando 9 parâmetros entre os 17. Entretanto, cabe destacar que para calibração das simulações do modelo SWAT com dados de vazão, um dos parâmetros mais utilizados na literatura é o Curva-número para a condição de umidade AMCII (CN2.mgt), uma vez que pequenas modificações nos seus valores de intervalos mínimo e máximo, podem produzir mudanças significativas no hidrograma resultante. Por exemplo, segundo Abbaspour et al. (2015), se o hidrograma simulado pelo SWAT apresentar picos de vazão abaixo dos picos observados, deve-se aumentar o valor do CN2.mgt, ou seja, aumentar os valores mínimo e máximo utilizados na parametrização. Ainda segundo os autores, se o fluxo de base simulado pelo SWAT estiver acima do observado, deve-se também aumentar os valores do CN2.mgt. Serrão et al. (2021) realizando modelagem hidrológica da vazão e produção hidrelétrica em uma bacia hidrográfica de grandes dimensões (Rio Tocantins-Araguaia, 918.822 km²), como a do presente estudo, utilizaram 11 parâmetros no processo de calibração (1995-2000) e validação (2000-2017) do modelo SWAT. Dentre os 11 parâmetros utilizados pelos autores, 8 foram adotados no presente estudo, sendo parâmetros relacionados principalmente à água subterrânea (GWQMN.gw, GW_DELAY.gw, ALPHA_BF.gw, GW_REVAP.gw, REVAPMN.gw), além dos parâmetros CN2.mgt, CH_K2.rte e SURLAG.bsn.

Tabela 1. Parâmetros base utilizados na calibração da bacia do Rio São Francisco (região sub-média)

Parâmetro	Valor Ajustado	Valor Mínimo	Valor máximo
1:A__GWQMN.gw	4000,00	4000,00	4000,00
2:V__GW_DELAY.gw	338,81	307,64	390,74
3:R__CN2.mgt	-0,18	-0,19	-0,18
4:R__SOL_AWC(..).sol	0,35	0,35	0,35
5:R__SOL_Z(..).sol	0,19	0,19	0,20
6:R__SOL_K(..).sol	0,21	0,21	0,27
7:A__CH_K2.rte	25,17	24,98	25,43
8:V__SURLAG.bsn	17,22	17,15	17,25
9:V__LAT_TTIME.hru	21,22	19,51	27,10
10:R__SLSUBBSN.hru	-0,08	-0,08	-0,08
11:R__HRU_SLP.hru	-0,20	-0,21	-0,20
12:V__RCHRG_DP.gw	0,26	0,23	0,31
13:R__ALPHA_BF.gw	-0,05	-0,06	-0,05
14:R__SOL_BD(..).sol	0,04	0,04	0,05
15:V__ALPHA_BNK.rte	-0,29	-0,29	-0,27
16:V__GW_REVAP.gw	0,20	0,20	0,20
17:V__REVAPMN.gw	34,68	30,00	35,67

Resultados e discussão

Análise de desempenho dos hidrogramas simulados pelo modelo SWAT com os dados observados

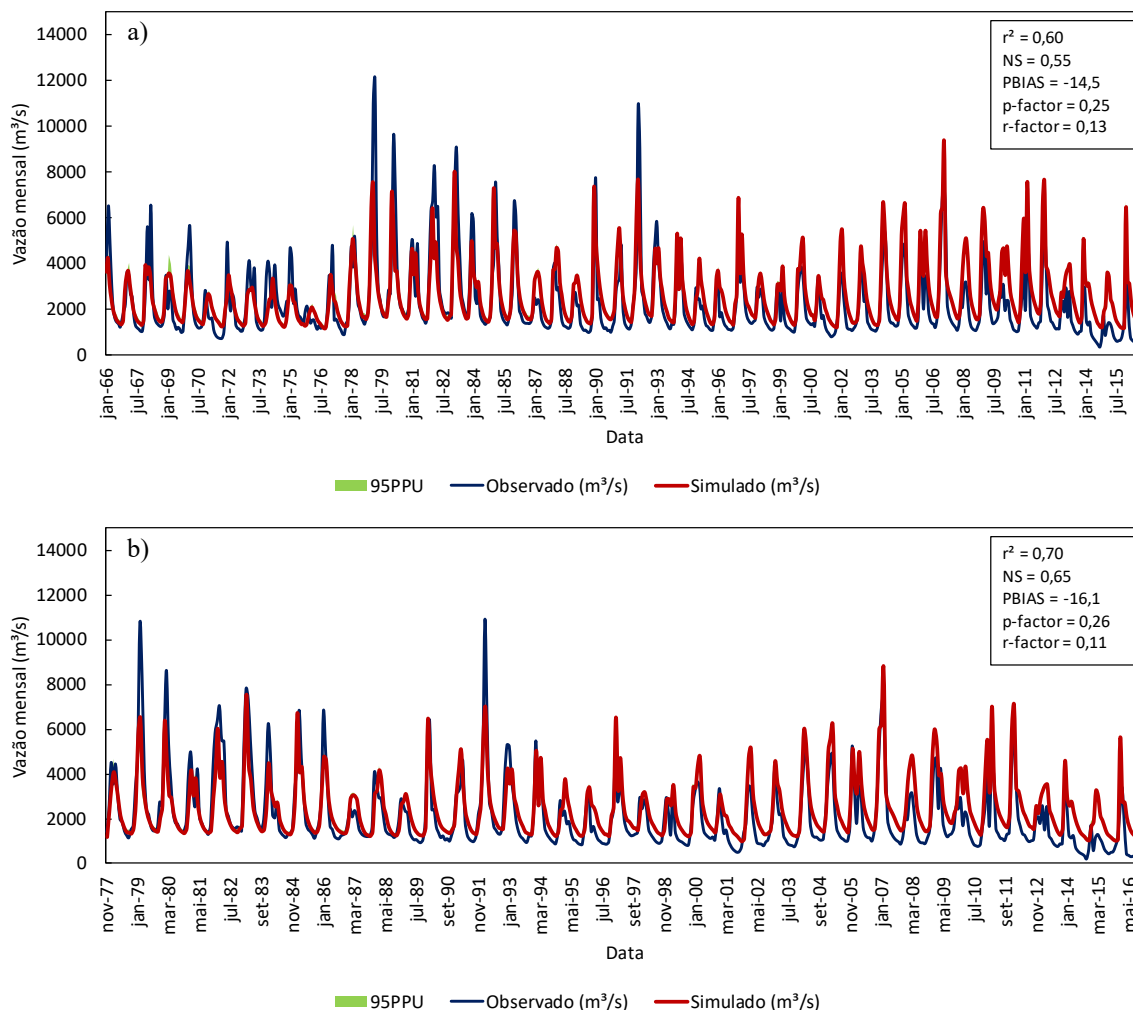
A Figura 2 apresenta os hidrogramas mensais com dados observado e simulado pelo modelo SWAT no período de calibração (1966-2016) na bacia do Rio São Francisco, considerando três estações: 127 (Figura 2a), 187 (Figura 2b) e 268 (Figura 2c), respectivamente. Para a bacia do Rio São Francisco, verifica-se que dentre as três estações fluviométricas avaliadas, todas apresentaram índices NS aceitáveis, com NS classificados como satisfatório ou bom, variando entre 0,55 e 0,69, de acordo com a classificação proposta por Moriasi et al. (2007). Silva et al. (2018) utilizando o modelo SWAT para simular a vazão e a resposta hidrológica a um conjunto de cenários futuros de mudanças na cobertura do solo na região do sub-médio da bacia do Rio São Francisco, área integrante do presente estudo, verificaram que de maneira geral, a vazão simulada pelo modelo SWAT foi maior do que a vazão observada, para ambos os períodos de calibração (1993–1994) e validação (1995–2004), principalmente durante os períodos de alta pluviosidade típica da região (janeiro a abril). Para o presente estudo, considerando toda a bacia do Rio São Francisco, a vazão simulada pelo SWAT foi

ligeiramente menor do que a vazão observada, com uma diferença relativa de aproximadamente 2% para ambos os períodos (janeiro a abril) nos anos de 1993 e 1994. Serrão et al. (2021) obtiveram valor de NS muito bom ao calibrar a bacia do Rio Tocantins-Araguaia, Brasil, com valor de 0,99. Segundo os autores, o modelo SWAT é capaz de simular de forma eficiente a vazão de uma bacia quando a mesma apresenta alta disponibilidade de água, exibindo excelentes índices estatísticos. Silva et al. (2018) obtiveram NS de 0,93 nas estações fluviométricas com maiores valores de vazão. Andrade et al. (2018) aplicando o modelo SWAT em uma bacia representativa do Nordeste brasileiro (Rio Mundaú, 4.090 km²), afirmaram que calibrar o modelo SWAT em períodos úmidos é uma tarefa mais fácil, devido a presença de picos de vazão mais frequentes, quando comparado aos períodos secos, onde a geração de fluxo é reduzida.

Em relação aos valores de r^2 , as estações apresentaram valores de 0,6 e 0,7, indicando que de maneira geral, há boa concordância entre os dados observados e simulados pelo modelo. Tal concordância é bastante visível nos hidrogramas, onde os dados observados são bem acompanhados dados simulados. Entretanto, verifica-se que nas estações, alguns picos observados não são bem representados pelo modelo, havendo, de maneira geral, subestimação dos picos desde o início do

período até meados de 1994, quando a partir desse ano, os picos começam a ser superestimados pelo modelo. Em relação ao fluxo de base, de maneira geral, verifica-se que há superestimativas pelo modelo, especialmente nos anos finais das estações 127 e 187. Santos et al. (2018) avaliando a resposta hidrológica às mudanças de uso do solo em uma grande bacia hidrográfica florestada pertencente a

bacia do Rio Amazonas (Rio Iriri, 142.000 km²) obtiveram valor de r^2 de 0,86 na calibração do modelo SWAT com dados de vazão (2001-2009). Martins et al., (2020) calibrando o modelo SWAT para bacia com cana-de-açúcar obteve NSE=0,60. Os autores afirmam que o modelo pode ser usado para a gestão da bacia em estudo.



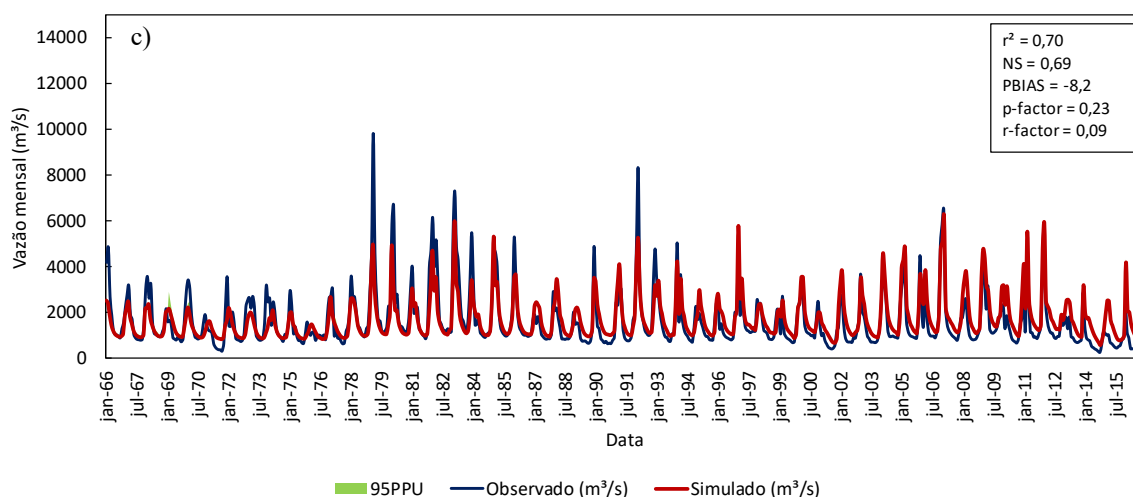


Figura 2. Hidrograma mensal com dados observado e simulado pelo modelo SWAT no período de calibração (1966-2016) na bacia do São Francisco, considerando as estações 127 (a), 187 (b) e 268 (c)

Em relação aos valores de PBIAS, verifica-se que todas as estações apresentaram valores classificados como satisfatório (estação 187), bom (estação 127) e muito bom (estação 268), segundo classificação proposta por Van Liew et al. (2007), indicando boa precisão na simulação do modelo. Santos et al. (2018) obtiveram valores de PBIAS de -7,47 nos processos de calibração, sendo classificado como muito bom.

Conclusões

1. Neste estudo, a bacia do Rio São Francisco foi calibrada utilizando dados de vazão em tempo mensal no período de 1961 a 2016. Considerando a representatividade da bacia hidrográfica para a modelagem hidrológica, os resultados foram muito satisfatórios. Uma boa concordância entre as séries temporais de vazão mensal simulada e observada foi demonstrada por meio dos hidrogramas, e também pelos índices estatísticos, com desempenhos desde “satisfatório” a “muito bom”.
2. O modelo SWAT calibrado para a bacia do Rio São Francisco pode ser utilizado para análises de cenários de mudanças climáticas e seus impactos sobre a disponibilidade hídrica da bacia, subsidiando assim, a tomada de decisão sobre os recursos hídricos, e a criação do modelo de gestão integrada com os demais países do BRICS.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à equipe de desenvolvedores do modelo SWAT – da Texas A&M University – por seu generoso suporte técnico. Além da Agência Nacional de Águas (ANA) e da Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC). Este estudo foi financiado em parte pela Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco (FACEPE), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP). Este estudo também foi parcialmente financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). Quaisquer opiniões, descobertas e conclusões ou recomendações expressas neste material são de responsabilidade dos autores e não refletem necessariamente as opiniões das organizações mencionadas acima.

Referências

- 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 J.* 3, 1340–1352.
- Abbaspour, K.C., Rouholahnejad, E., Vaghefi, S., Srinivasan, R., Yang, H., Klove, B., 2015. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *J. Hydrol.* 524, 733–752.
- Abbaspour, K.C., Vaghefi, S.A., Srinivasan, R., 2018. A guideline for successful calibration and uncertainty analysis for soil and water

- assessment: a review of papers from the 2016 International SWAT Conference. *Water* 10 (6), 1–18.
- Andrade, C.W.L., Montenegro, S.M.G.L., Montenegro, A.A.A., Lima, J.R.S., Srinivasan, R., Jones, C.A., 2021. Climate change impact assessment on water resources under RCP scenarios: A case study in Mundaú River Basin, Northeastern Brazil. *International Journal of Climatology* 41, 1045-1061.
- Andrade, C.W.L., Montenegro, S.M.G.L., Montenegro, A.A.A., Lima, J.R.S., Srinivasan, R., Jones, C.A., 2018. Soil moisture and discharge modeling in a representative watershed in northeastern Brazil using SWAT. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 19, 238–251.
- Arnold, J.G., Moriasi, D.N., Gassman, P.W., Abbaspour, K.C., White, M.J., Srinivasan, R., Santhi, C., Harmel, R.D., Van Griensven, A., Van Liew, M.W., Kannan, N., Jha, M.K., 2012. SWAT: Model use calibration and validation. *Transactions of the ASABE* 55, 1491 – 1508.
- Bueno, E.O., Oliveira, V.A., Viola, M.R., Mello, C.R., 2017. Desempenho do modelo SWAT para diferentes critérios de geração de Unidades de Resposta Hidrológica. *Revista Scientia Agraria*, 18 (2), 114-125.
- Brighenti, T.M., Bonumá, N.B., Grison, F., Mota, A.A., Kobiyama, M., Chaffe, P.L.B., 2019. Two calibration methods for modeling streamflow and suspended sediment with the SWAT model. *Ecological Engineering* 127, 103–113.
- Gupta, H.V., Sorooshian, S., Yapo, P.O., 1999. Status of automatic calibration for hydrologic models: comparison with multilevel expert calibration. *J. Hydrol. Eng.* 4 (2), 135–143.
- IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change: Summary for policymakers. In: *Climate change 2021: the physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S.L., Péan, C., et al. Cambridge University Press, 40 p., 2021.
- Lins, F.A.C., Montenegro, A.A.A., Farias, C.W.L.A., Chagas, A.M.S., Miranda, R.Q., Galvêncio, J.D., 2021. Análise da dinâmica temporal da evapotranspiração real em uma bacia hidrográfica do semiárido através de modelagem hidrológica e sensoriamento remoto. *Irriga* 26 (3), 543-564.
- Martins, L., Martins, W., Morais, J., Junior, M., De Maria, I. 2020. Calibração hidrológica do modelo SWAT em bacia hidrográfica caracterizada pela expansão do cultivo da cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 13, 576-594. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.2.p576-594>
- Queiroga, M. R., Galvêncio, J. D., Moura, M. S. B., Srinivasan, R. 2017. Paralelização do algoritmo SU2: Uma abordagem Windows, *Revista Brasileira de Geografia Física* 10, 1535-1544. DOI: [10.26848/rbgf.v10.5.p1535-1544](https://doi.org/10.26848/rbgf.v10.5.p1535-1544)
- Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Binger, R.L., Harmel, R.D., Veith, T.L., 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Trans. ASABE* 50 (3), 885–900.
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models: Part 1. A discussion of principles. *J. Hydrol.* 10, 282–290.
- Nkiaka, E., Nawaz, N.R., Lovett, J.C., 2018. Effect of single and multi-site calibration techniques on hydrological model performance, parameter estimation and predictive uncertainty: a case study in the Logone catchment, Lake Chad basin. *Stoch Environ Res Risk Assess* 32, 1665–1682.
- Santos, V., Laurent, F., Abe, C., Messner, F., 2018. Hydrologic Response to Land Use Change in a Large Basin in Eastern Amazon. *Water*, 10, 1–19.
- Serrão, E. A. O., Silva, M. T., Ferreira, T. R., Ataíde, L.C.P., Wanzeler, R.T.S., Silva, V.P.R., Lima, A.M.M., Sousa, F.S., 2021. Large-Scale hydrological modelling of flow and hydropower production, in a Brazilian watershed. *Ecohydrology & Hydrobiology* 21, 23–35.
- Silva, V.P.R., Silva, M.T., Singh, V.P., Souza, E.P., Braga, C.C., Holanda, R.M., Almeida, R.S.R., Sousa, F.A.S., Braga, A.C.R., 2018. Simulation of stream flow and hydrological response to land-cover changes in a tropical river basin. *CATENA* 162, 166–176.
- Van Liew, M.W., Veith, T.L., Bosch, D.D., Arnold, J.G., 2007. Suitability of SWAT for the conservation effects assessment project: a comparison on USDA-ARS watersheds. *Journal of Hydrological Engineering* 12, 173-189.
- Viana, J.F.S., Montenegro, S.M.G.L., Silva, B.B., Silva, R.M., Srinivasan, R., 2019. SWAT parameterization for identification of critical erosion watersheds in the Pirapama River Basin, Brazil. *Journal of Urban and Environmental Engineering* 13, 42-58.