

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

CALIBRAÇÃO DO MODELO SWAT+ APLICADO EM SUB-BACIAS ESTRATEGICAMENTE SELECIONADAS DO RIO PARAÍBA DO SUL PARA VALIDAÇÃO DA PREVISÃO DE VAZÃO NA BACIA E EM SEUS RESERVATÓRIOS PARA GERAÇÃO HIDRELÉTRICA

*Afonso A. M. de Araujo¹; Mauricio Nogueira Frota²; Gabriel Titara³; Marcel Pereira de Andrade⁴;
Lude Quieto Viana⁵; Cesar Augusto Silva de Farias⁶ & Felipe Abrantes Rodrigues Souza⁷*

Abstract: This study was conducted under the Programa de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação of ANEEL by Light Energia, in partnership with the Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro and Universidade Federal de Campina Grande. It presents preliminary results from calibrating the SWAT+ model, comparing simulated streamflow with observations from gauging stations in twenty-two sub-basins of the Paraíba do Sul River basin in southeastern Brazil. The calibration process aimed to support the development of a hydrometeorological modeling system integrating the WRF atmospheric model with the SWAT+ hydrological model to forecast daily streamflow up to seven days in advance, especially in regions contributing inflows to hydroelectric reservoirs. The SWAT+ model was implemented using the QSWAT+ interface, incorporating topographic data from the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), land use and cover data from the MAPBIOMAS project, and the drainage network from the National Water and Basic Sanitation Agency (ANA). To optimize computational efficiency and streamline calibration, the basin was divided into four regions, each calibrated independently. Among the evaluated sub-basins, the best model performance was achieved for the Funil reservoir (*Nash Number* = 0.84; *p-factor* = 0.67; *r-factor* = 1.45, R^2 = 0,87), while the lowest performance was found in the Piraí River basin (*Nash Number* = 0.44; *p-factor* = 0.70; *r-factor* = 0.82; R^2 = 0,46). The results suggest that the proposed calibration strategy is a promising approach for validating the modeling tool to support integrated watershed management and hydroelectric power generation planning.

Resumo: Este estudo foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação da ANEEL pela empresa Light Energia e pelo Consórcio formado pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro e Universidade

1) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Avenida Athos da Silveira Ramos, 149, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro, RJ, CEP: 21941-909 - Brasil, (21) 97922-4455, afonsoaraujo@poli.ufrj.br

2) Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rua Marquês de São Vicente, 225, Gávea, Rio de Janeiro, RJ, CEP: 22451-900 – Brasil, (21) 97094-4475, mfrota@puc-rio.br

3) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Avenida Athos da Silveira Ramos, 149, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro, RJ, CEP: 21941-909 - Brasil, (21) 96957-3907, gtitara@poli.ufrj.br

4) Universidade Federal de Juiz de Fora, Rua José Lourenço Kelmer, s/n , São Pedro , Juiz de Fora , MG, CEP: 36036-330 – Brasil, (32) 98430-3761, marcel.pdandrade@gmail.com

5) Light Energia, Av. Mal. Floriano, 168, Centro, Rio de Janeiro - RJ, CEP: 20080-002 – Brasil, (21) 98249-4424, lude.viana@light.com.br

6) Light Energia, Av. Mal. Floriano, 168, Centro, Rio de Janeiro - RJ, CEP: 20080-002 – Brasil, (24) 99911-2905, cesar.farias@light.com.br

7) Light Energia, Av. Mal. Floriano, 168, Centro, Rio de Janeiro - RJ, CEP: 20080-002 – Brasil, (24) 99968-8311, felipe.abrantes@light.com.br

Federal de Campina Grande. Trata-se da apresentação dos resultados preliminares da calibração do modelo SWAT+, comparando-os com dados de estações fluviométricas de vinte e duas sub-bacias na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul, localizada no Sudeste do Brasil. O processo de calibração concebido buscou integrar o modelo atmosférico WRF e o modelo hidrológico SWAT+, visando a previsão de vazões diárias com horizonte de até sete dias, em especial nas regiões afluentes aos reservatórios de geração hidrelétrica. A implementação topológica do modelo SWAT+ utilizou o aplicativo QSWAT+, com dados topográficos do Radar Topography Mission (SRTM), uso e cobertura do solo disponibilizados pelo projeto MAPBIOMAS e rede de drenagem da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Para reduzir o tempo de computação e o processo de calibração, o modelo topológico da bacia foi dividido em quatro regiões e calibrado de forma independente. O melhor desempenho agregado obteve Número de Nash= 0,84; fator-p = 0,67; fator-r = 1,45; R2 = 0,87, para reservatório de Funil, e o pior Número de Nash= 0,44; fator-p = 0,70; fator-r = 0,82; R2 = 0,46, para bacia do rio Piraí. Conclui-se que a estratégia de calibração proposta é promissora para validar a ferramenta computacional para a gestão integrada da bacia hidrográfica visando à geração hidrelétrica.

Palavras-Chave – SWAT+; SWAT+CUP; calibração.

INTRODUÇÃO

Este trabalho apresenta resultados preliminares de um dos quatro módulos que fazem parte do projeto MOVASC – Modelagem de Vazão, Sedimento e Clima / PD-05161-0025/2024. Este projeto faz parte do Programa de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação da ANEEL e foi elaborado pela empresa Light Energia junto com o Consórcio formado pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro e Universidade Federal de Campina Grande. O principal resultado da primeira etapa foi a integração de um modelo de previsão de tempo com um modelo hidrológico gerando previsão de chuva e vazão para até sete dias. Os resultados da primeira etapa do projeto, seus benefícios socioambientais e o uso da ferramenta como estratégia integrada de gestão de recursos hídricos são relatados em outro trabalho. (Frota et al., 2023). O projeto atualmente está na segunda etapa cujo foco é a modelagem hidrossedimentológica e previsão de assoreamento em reservatórios da Light.

A bacia do rio Paraíba do Sul, localizada na região Sudeste do Brasil, possui importância estratégica na composição do Produto Interno Bruto (PIB) nacional. Sua área é de cerca de 55.500 km², e atende à alta demanda de água para atividades industriais, consumo urbano, irrigação e geração de energia elétrica.

O objetivo do estudo aqui exposto é apresentação do processo de calibração adotado para a implementação de um sistema de modelagem hidrometeorológica de previsão de vazões em toda a bacia do rio Paraíba do Sul (BPS), com ênfase especial nos reservatórios operados por empresas de geração de energia elétrica.

Neste primeiro ciclo, o modelo SWAT+ (Bieger, K. et al., 2017) estruturado topologicamente, foi calibrado com base em um conjunto de dados de entrada composto por estações meteorológicas e uma rede de pluviômetros, testados exaustivamente em diferentes composições (cenários). Em seguida, o sistema de modelagem foi implementado de forma operacional, recebendo dados das forçantes do modelo atmosférico WRF, também calibrado no contexto do projeto “Modelagem de Vazão, Sedimento e Clima (MoVaSC – Frota et al., 2023)”.

METODOLOGIA

Implantação da topologia do modelo:

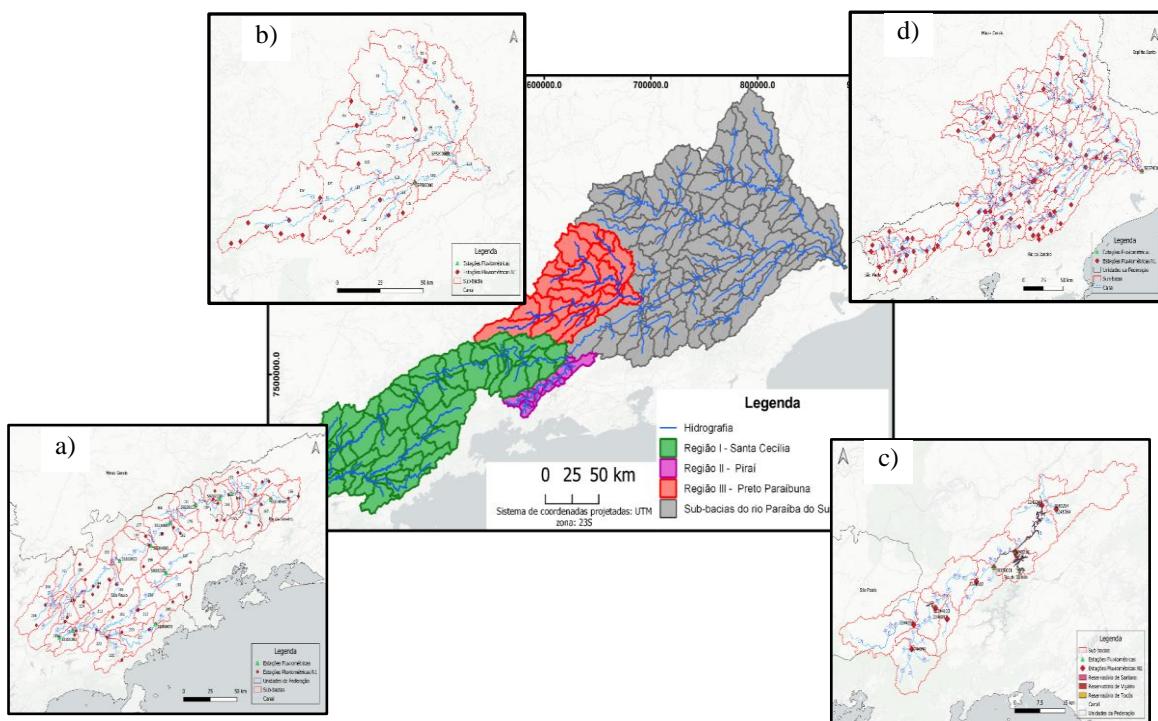
A estrutura topológica do SWAT+ foi construída com o auxílio da interface QSWAT+, a partir de mapas digitais de topografia com resolução de 90 metros (SRTM90m), geologia, uso e cobertura do solo (MAPBIOMAS, 2020). Inicialmente, a estrutura padrão resultante apresentou um número excessivo de sub-bacias que, inicialmente submetido ao processo de calibração (detalhado mais adiante), mostrou-se praticamente inviável, exigindo um exaustivo e meticoloso processo de refinamento, conforme resumido na Tabela 1.

Tabela 1 – Características da Topologia do Modelo

Elementos do Modelo	Topologia Padrão	Topologia Revisada	Sub-bacia FUNIL	Sub-bacia PIRÁI	Sub-bacia PRETO-PARAIBUNA.
Sub-bacias	809	233	64	14	27
Canais	3148	273	64	54	27
LSU	3148	273	64	54	27
HRU	17636	2067	513	377	244

Nota-se que o número de sub-bacias foi reduzido de 809 para 233, o que corresponde ao número de pontos onde o modelo fornece simulações e/ou previsões de vazão. Por construção, os demais elementos da estrutura topológica (canais, LSUs e HRUs) também sofreram redução, sendo que, as HRUs, são as que mais impacto têm sobre o tempo de simulação. Outro processo de refinamento que se mostrou altamente efetivo para os exercícios de calibração foi o desmembramento em submodelos, conforme ilustrado na Figura 1 e já exposto na Tabela 1.

Figura 1 – Desacoplamento do modelo em regiões (sub-bacias).



Estrutura de Calibração:

O processo de calibração de modelos físicos semi-distribuídos é tarefa reconhecidamente árdua e complexa, tornando-se mais desafiadora ao envolver toda a Bacia do Rio Paraíba do Sul, devido não apenas suas dimensões, mas também pelo elevado nível de antropização, usos múltiplos e intensivos dos recursos hídricos, associados a processos de ocupação, atividades industriais e agrícolas, num contexto de disponibilidade de dados limitados em qualidade e quantidade espaço-temporal.

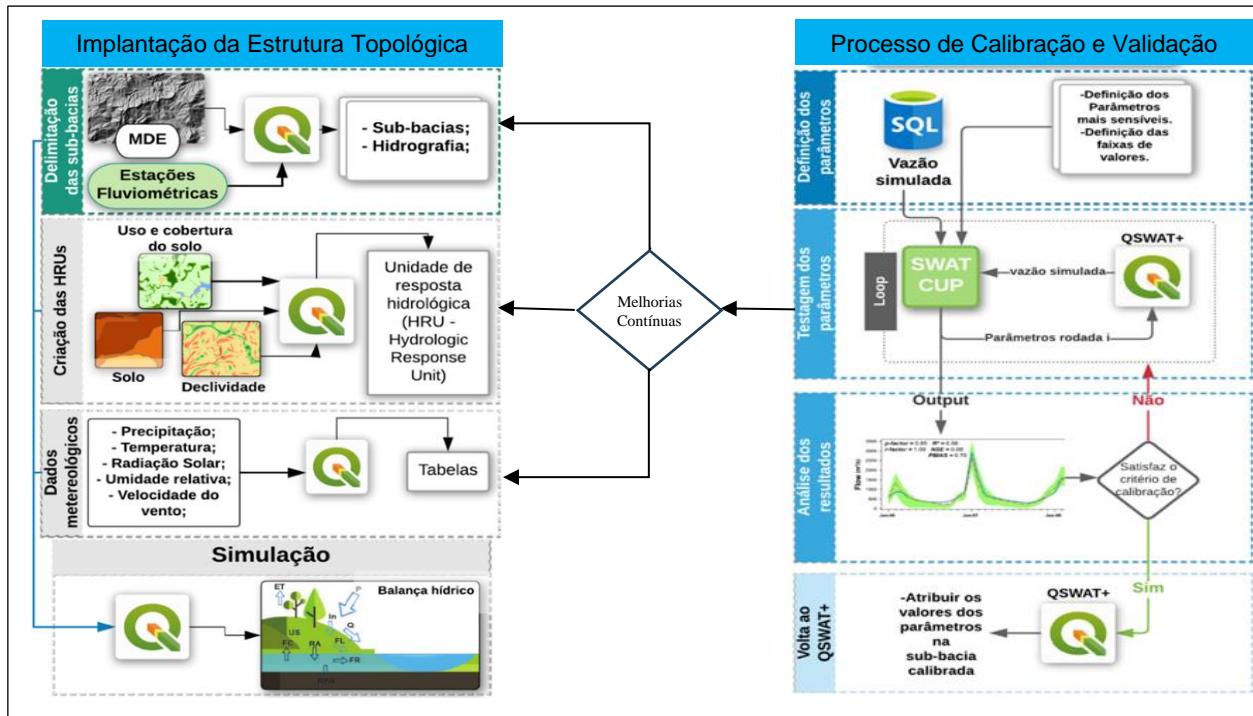
Partindo-se das orientações clássicas da literatura, em especial as especializadas para o modelo SWAT+ (Abbaspour *et al.*, 2018, Abbaspour, 2015 e 2005, Arnold *et al.*, 2012) procedeu-se o processo de seleção e testagem dos parâmetros de calibração, de acordo com o ciclo sintetizado no painel direito da Figura 2, tendo sido necessário retornar ao ciclo de implantação da estrutura topológica do modelo para ajustes (painel esquerdo da Figura 2).

Como o modelo WRF estava em fase de configuração (ver Senna *et al.*, 2023), cinco cenários de forçantes meteorológicas foram considerados no processo de calibração (Tabela 2), envolvendo combinações de estações meteorológicas convencionais do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), da Agência Nacional de Águas (ANA) e estações automáticas de diferentes agentes, cujos arranjos espaciais estão ilustrados na Figura 3.

Além das forçantes, os cenários também consideraram ajustes nos parâmetros de permeabilidade do solo (Curve Number - CN) e na evapotranspiração. As simulações das etapas de calibração foram realizadas com o aplicativo SWAT+-CUP (Abbaspour *et al.*, 2018).

Em face da já referida limitação dos dados observados para forçar o modelo, um exaustivo trabalho de seleção e consistência foi realizado (não apresentado aqui), resultando em um período de aquecimento de 7 anos (1998 a 2004) e calibração de 10 anos (2005 a 2014).

Figura 2 – Implantação da topologia do modelo e estrutura de calibração



Entre as simplificações adotadas, os reservatórios não foram inseridos de forma explícita no modelo topológico, e as bacias modeladas foram consideradas em seu estado original, o que foi possível graças ao uso das séries de vazões naturais disponibilizadas pelo ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico).

Cenários de Modelagem:

Foram considerados cinco cenários de modelagem, construídos a partir da combinação de diferentes níveis de refinamento da estrutura topológica do modelo e diferentes composições de dados de entrada, conforme resumido na Tabela 2.

Tabela 2 – Dados de entrada dos cenários

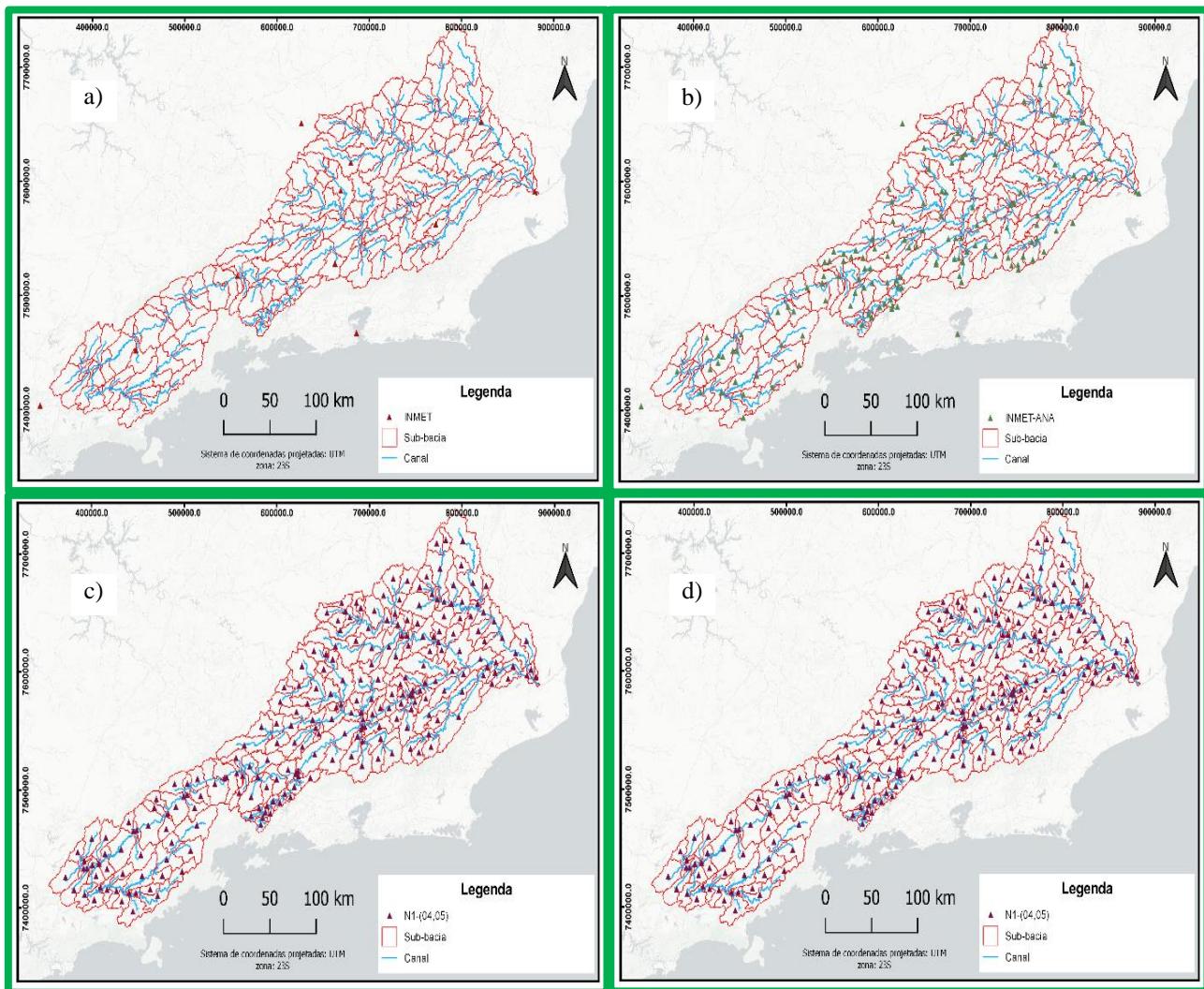
Cenário	Topologia do Modelo	Forçantes Meteorológicas
1	Topologia Padrão do Modelo	INMET: estações meteorológicas convencionais
2	Topologia Padrão do Modelo	INMET-ANA: estações meteorológicas convencionais + estações pluviométricas ANA
3	Topologia Padrão do Modelo	N1-00: estações meteorológicas do INMET + convencionais da ANA + telemétricas de diversos operadores
	Topologia Padrão do Modelo	N1-01: N1-00 com dados de precipitação pro mediadas sem modificar a posição geográfica
	Topologia Padrão do Modelo + ajuste CNs	N1-02: base de dados N1-01
	Topologia Padrão do Modelo + ajuste CNs + ajuste da evapotranspiração	N1-03: base de dados N1-02
4	Topologia Padrão do Modelo	N1-04: precipitações da base N1-00 pro mediadas para cada sub-bacia com o método IDW
5	Topologia Padrão do Modelo + ajuste CNs + ajuste da evapotranspiração	N1-05: precipitações da base N1-03 pro mediadas para cada sub-bacia com o método IDW

Estrutura Espacial da Base de Dados:

Conforme referido anteriormente, o modelo de previsão numérica do tempo WRF que será responsável por fornecer os forçantes meteorológicos para conduzir a previsão de vazões do SWAT+ estava em fase de configuração, em paralelo ao processo de calibração do SWAT+, portanto, não tendo histórico suficiente para participar do processo de calibração.

Em um horizonte de médio-longo prazos, no contexto de um processo de evoluções estruturadas e melhorias contínuas, na medida em que a configuração do WRF se mostre capaz de produzir previsões consistentes e úteis, pretende-se incorporar estes dados não somente no período de aquecimento do modelo, mas também em novos ciclos de calibração. A Figura 3 ilustra a distribuição espacial dos diferentes arranjos de dados utilizados no processo de calibração sintetizados na Tabela 2 já citada.

Figura 3 – Distribuição espacial dos diferentes arranjos de dados de entrada a) INMET; b) INMET-ANA; c) N1-(0,1,2,3); d) N1-(04,05)

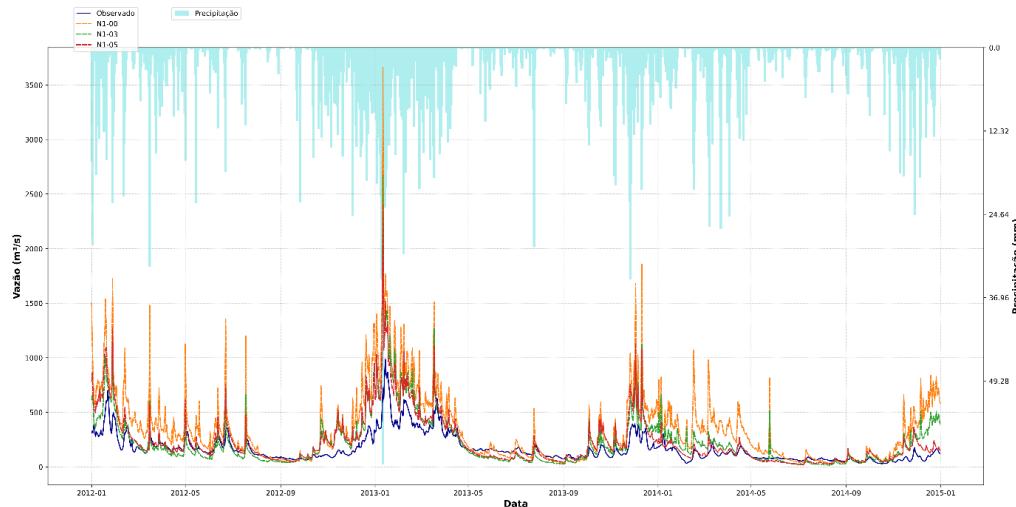


RESULTADOS

Os submodelos das regiões denominadas de FUNIL, PIRÁÍ e PRETO-PARAIBUNA, mostrados, respectivamente, nos painéis *a*, *b* e *c* da Figura 1, anteriormente referida, foram calibrados de forma independente. O submodelo da região denominada de EXUTÓRIO, por ser dependente do resultado da calibração das regiões à montante, foi calibrado no modelo completo, absorvendo os resultados das calibrações anteriores.

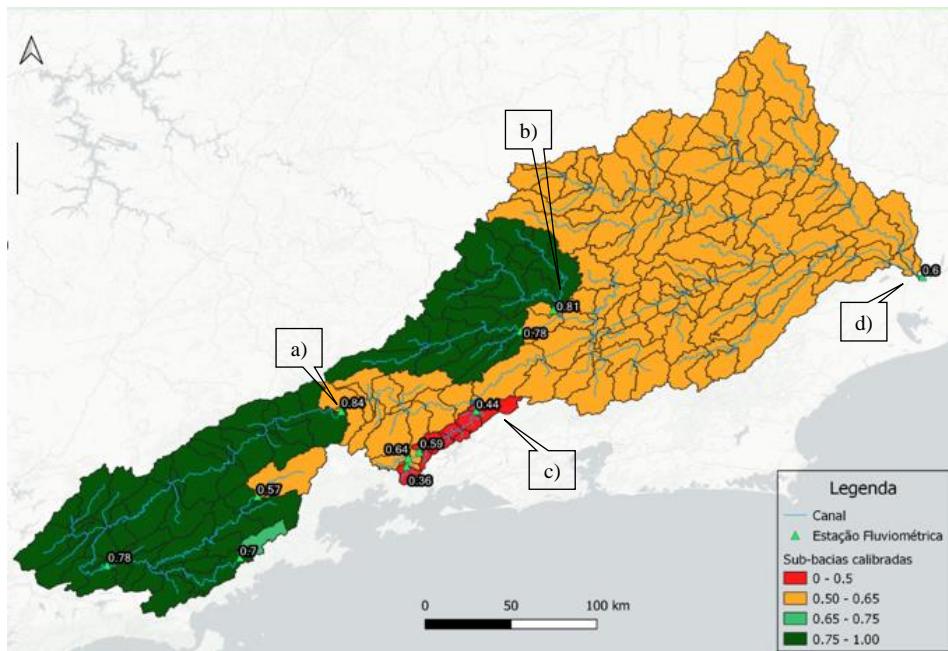
A título de exemplo do efeito que os refinamentos associados aos cenários de calibração proporcionaram, a Figura 4 mostra a comparação das simulações obtidas a partir do modelo padrão (*default*), ou seja, sem calibração, evidenciando assim que, melhorias no processo de implantação e refinamento nos dados de entrada podem aperfeiçoar, de forma significativa, o resultado inicial do modelo, possivelmente, facilitando o processo de calibração.

Figura 4 – Simulações com o submodelo padrão (FUNIL) para os diferentes cenários (Tabela 2), comparando as bases N1-00, N1-03 e N1-05 com dados observados.



A Figura 5 sintetiza os principais resultados do processo de calibração. O melhor desempenho da estratégia ocorreu na região de FUNIL, com um Número de Nash (Nash-Sutcliffe, 1970) (NS) = 0,84 no exutório da região, um p -factor = 0,67, r -factor = 1,45 e R^2 = 0,87. Seguindo-se as regiões do PRETO-PARAIBUNA (NS = 0,81; p -factor = 0,96, r -factor = 1,09 e R^2 = 0,82), EXUTÓRIO (NS = 0,60; p -factor = 0,75, r -factor = 1,92 e R^2 = 0,65) e, PIRAIÍ (NS = 0,44; p -factor = 0,70, r -factor = 0,82 e R^2 = 0,46).

Figura 5 – Principais resultados do Número de Nash.

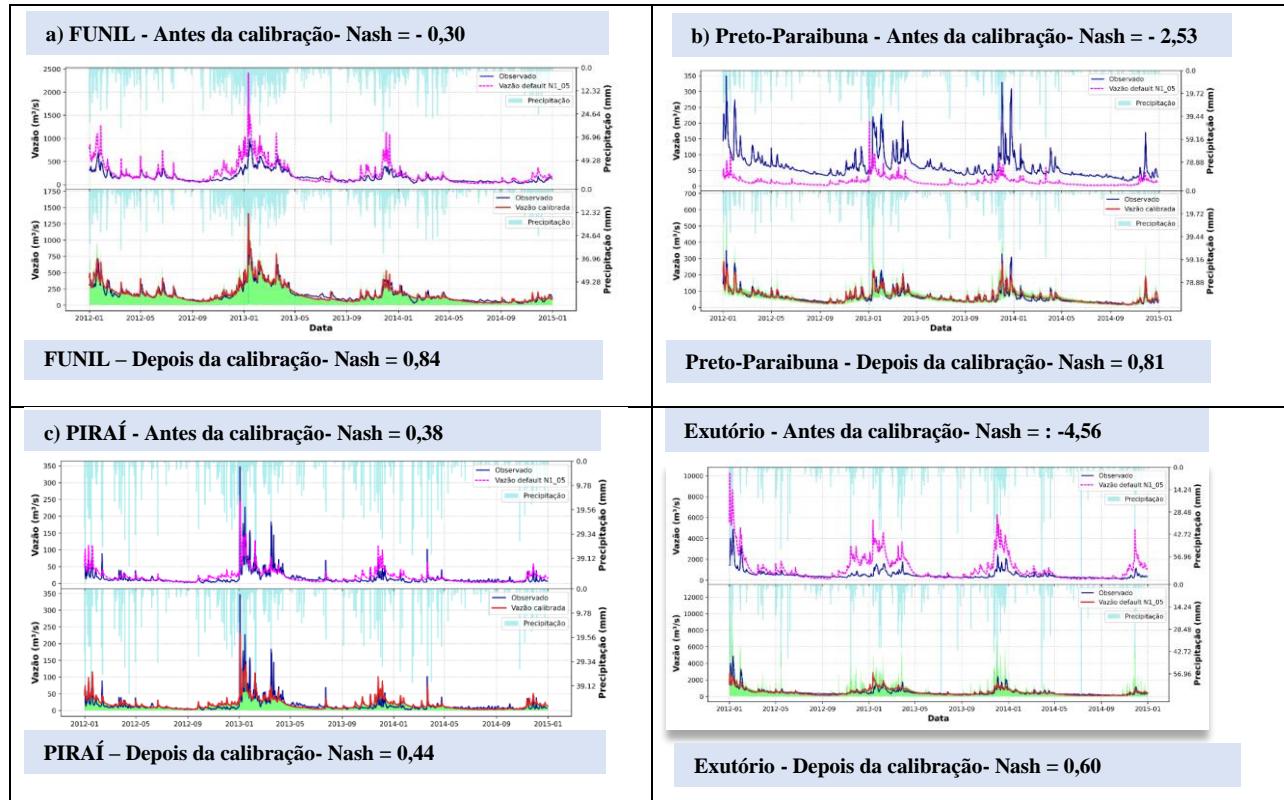


Os gráficos mostrados na Figura 6 ilustram, nos painéis superiores, a comparação entre a vazão simulada com o modelo sem calibração para o melhor cenário (N1-05) e a vazão observada no período de 2012 a 2014. Nos painéis inferiores, compara-se a vazão simulada com o modelo calibrado e a vazão observada, acrescentando-se as respectivas bandas de incerteza. Os pontos correspondem aos

exutórios das quatro regiões: a) FUNIL, b) PRETO-PARAIBUNA, c) PIRÁI e d) EXUTÓRIO e relacionam-se com a Figura 5.

Em complementação ao ilustrado na Figura 4, as comparações mostradas na Figura 6 deixam claro os efeitos do processo de calibração. Nota-se também que as bandas de incerteza ainda se encontram bastante amplas, apontando a necessidade de aperfeiçoamentos no processo de calibração, não se excluindo aperfeiçoamentos na estrutura topológica do modelo.

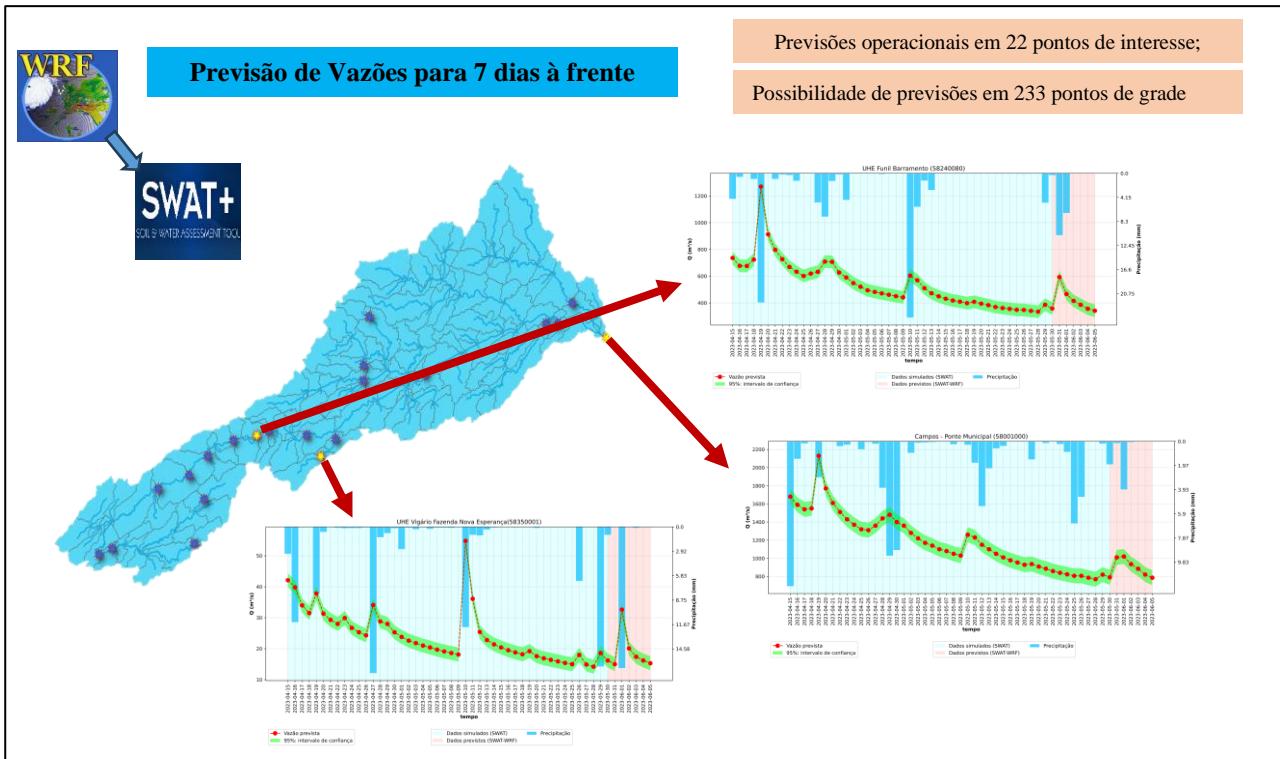
Figura 6 – Comparação da vazão simulada (com e sem calibração) com a vazão observada e bandas de incertezas.



Com o modelo SWAT+ calibrado e o modelo atmosférico WRF entrando em operação, a plataforma de modelagem hidrometeorológica ganhou forma e foi colocada em operação, produzindo, em fase de teste, a partir de 22/08/2022, previsões de vazão na escala diária, para sete dias à frente. A Figura 7 apresenta uma síntese esquemática da plataforma de modelagem que, na configuração operacional atual é capaz de produzir previsões em 233 pontos de grade, dos quais, 22 foram previamente selecionados como pontos de interesse

Adicionalmente, ainda na Figura 7 e, a título de ilustração, apresenta-se os gráficos para os pontos UHE Funil Barramento, UHE Vigário Fazenda Nova Esperança e Campos – Ponte Municipal, que exibem uma parte do período de simulação de aquecimento (em azul), seguido da previsão de sete dias (em vermelho).

Figura 7 – Visão sintética da plataforma de modelagem hidrometeorológica e previsão de vazões.



CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Tendo como base as faixas preconizadas para o indicador proposto por Nash-Sutcliffe (1970), pode-se qualificar os resultados obtidos para as regiões de FUNIL, PRETO-PARAIBUNA e EXUTÓRIO como “modelo capaz de produzir previsões de boa qualidade” ($0,75 < NS \leq 1,00$).

Entretanto, para a região do PIRÁÍ, o modelo apresentou desempenho abaixo do desejado ($NS \leq 0,50$), não sendo capaz de produzir resultados melhores do que a própria média dos dados.

Ressalta-se que, as estratégias adotadas em complementação aos procedimentos clássicos de calibração de modelos hidrológicos, notadamente a adoção de cenários de modelagem bem estruturados e o desmembramento em submodelos mostraram-se bastante acertadas. No caso da subdivisão do modelo, esta abordagem não só viabilizou o processo de calibração, mas permitiu inúmeros benefícios como a redução dos tempos de máquina, o aumento significativo do número de simulações, refinamentos pontuais, entre outros.

Com estes resultados preliminares e, no contexto da estratégia de construir o modelo mais simples e que, ao mesmo tempo, fosse capaz de produzir resultados úteis, adotada como racionalidade geral, vislumbra-se um grande potencial de aperfeiçoamento dos resultados, tendo como alvo especial de atenção a região do PIRÁÍ em ciclos de aperfeiçoamentos e melhorias contínuas.

Alguns outros fatores relevantes contribuem para esta expectativa positiva: a) a significativa curva de aprendizado acumulada durante a primeira fase do projeto P&D MoVaSC-I, ao longo da qual foram mapeados diversos pontos de melhoria, envolvendo desde a implantação da estrutura topológica, passando pelos forçantes meteorológicos e o processo de calibração-validation propriamente dito; b) as significativas evoluções na nova versão do modelo SWAT+, incluindo o

aplicativo de calibração; c) a incorporação de novas bases de dados; d) a incorporação de ferramentas de aprendizado de máquina, tanto nas etapas de pré e pós processamento.

Por fim, conclui-se que a estratégia de calibração proposta é promissora para validar a ferramenta computacional para a gestão integrada da bacia hidrográfica visando à geração hidrelétrica.

REFERÊNCIAS

- ABBASPOUR, K.C.; VAGHEFI, S.A.; SRINIVASAN, R. A (2018). *Guideline for Successful Calibration and Uncertainty Analysis for Soil and Water Assessment: A Review of Papers from the 2016 International SWAT Conference Water 2018, 10, 6.* <https://doi.org/10.3390/w10010006>.
- ABBASPOUR, K.C. (2005). *Calibration of hydrologic models: When is a model calibrated?* In Proc. Intl. Congress on Modelling and Simulation (MODSIM'05), 2449-2455. A. Zerger and R. M. Argent, eds. Melbourne, Australia: Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand.
- ABBASPOUR, K.C. (2015). *SWAT-CUP: SWAT Calibration and Uncertainty Programs.* Technical reference of SWAT-CUP. Acessado em junho/2021.
- ARNOLD, J. G.; KINIRY, J.R.; SRINIVASAN, R.; WILLIAMS, J.R.; HANEY, E.B.; NEITSH, S.L. (2012). *Soil and Water Assessment Tool Input/Output File Documentation – Version 2012.*
- BIEGER, K.; ARNOLD, J. G.; RATHJENS, H.; WHITE, M. J.; BOSCCH, D. D.; ALLEN, P. M.; VOLK, M.; and SRINIVASAN, R. (2017). *Introduction to SWAT+, a Completely Restructured Version of the Soil and Water Assessment Tool.* Journal of the American Water Resources Association (JAWRA) 53(1): 115– 130. doi.org/10.1111/1752-1688.12482.
- MAPBIOMAS (2020). *MapBiomass General “Handbook”.* Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD), Collection 5, Version 1.0. link: <https://mapbiomas.org/download-dos-atbds>.
- NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. (1970). *River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles.* *Journal of Hydrology.* 10 (3):282–290. [doi:10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6).
- FROTA M.N; FRANÇA G.B.; SOUZA E.P.; ARAUJO, A.A.M.; GODOY J.M. e VIANA L.Q. (2023). *O Ciclo das Águas da Bacia do Paraíba do Sul. Uma ferramenta estratégica de gestão integrada do Sistema Hidrelétrico.* ISBN: 978-65-88831-76-2. CDD: 551.48098153. Editora PUC-Rio. 340p. E-Book: http://www.editora.puc-rio.br/media/29_PUC_ciclo_aguas_ebook_fz.pdf.