

MODELAGEM INTEGRADA DE ÁGUAS SUPERFICIAIS E SUBTERRÂNEAS NO SEMIÁRIDO COM O MODELO SWAT+*gwflow*

HENRIQUE SANCHEZ FRANZ¹; BRUNA MOURA²; DANIELLE BRESSIANI³;
JULIANA PERTILLE⁴

¹Universidade Federal de Pelotas – franzhenrique@yahoo.com.br

²Universidade Federal de Pelotas – brunabmoura0304@gmail.com

³Universidade Federal de Pelotas – daniebressiani@gmail.com

⁴Universidade Federal de Pelotas - juliana.pertill@gmail.com

1. INTRODUÇÃO

No semiárido brasileiro os fluxos hidrológicos são influenciados pela sazonalidade, com um período chuvoso e um período seco (MARENGO & BERNASCONI, 2015). As características naturais do semiárido são desafiadoras para gestão dos recursos hídricos, pois durante o período seco a disponibilidade de água fica limitada, principalmente dos mananciais superficiais (PETERS et al. 2006). Logo, os mananciais subterrâneos têm potencial de auxiliar a suprir a demanda. Entretanto, o uso de água sem planejamento adequado pode acarretar problemas de segurança hídrica e desencadear em conflitos relacionados ao uso da água (ACSELRAD, 2004).

Visando realizar o uso de água da forma mais eficiente possível estudo hidrológicos se fazem necessários. Dentre as diversas ferramentas para o desenvolvimento de estudos hidrológicos, os modelos numéricos computacionais, há décadas, mostram-se como ferramentas capazes de estimar os fluxos hidrológicos. Dentre os modelos mais utilizados, destaca-se o SWAT – *Soil & Water Assessment Tool*, recentemente foi desenvolvido o SWAT+ uma versão mais atualizada que possibilita incluir mais feições e conexões hidrológicas (BIEGER et al., 2017). Uma das limitações dos estudos hidrológicos que utilizam o SWAT é que os fluxos subterrâneos não são estimados. Como melhoria recentemente foi desenvolvido o módulo *gwflow* que é acoplado ao modelo SWAT+ e estima fluxos subterrâneos para aquíferos livres.

Diante do exposto o presente estudo visa estimar os fluxos superficiais e subterrâneos para uma bacia hidrográfica no semiárido brasileiro com o SWAT+*gwflow*. A área de estudo selecionada foi a bacia hidrográfica do rio Batateiras localizada no sul do estado do Ceará. O principal motivo para escolha dessa região é devido ao alto número de poços, sendo está a região com a maior densidade de poços registrados do Brasil com 0.0019 poços por Km² (RENNA CAMACHO, 2023).

2. METODOLOGIA

A construção do modelo SWAT+*gwflow* se deu em três etapas: construção do modelo hidrológico SWAT+, construção do modelo geohidrológico *gwflow* e avaliação da performance do modelo SWAT+ *gwflow*. Para a construção do modelo SWAT+ foram utilizados os seguintes dados de entrada: modelo digital de elevação com 30 m de resolução, mapa de solos, dados de parâmetros de solos, mapa de uso e ocupação e dados climáticos. O processamento dos dados foi realizado com códigos, tabelas de Excel e rotinas no QGIS, através da interface QSWAT+. A execução do modelo foi realizada com o SWAT+ editor.

Uma vez construído o modelo hidrológico SWAT+, a segunda etapa consiste na construção do modelo geohidrológico *gflow*. Inicialmente foi construído um grid com células de 200 por 200 metros totalizando 78548 células. Com base no mapa hidrogeológico as células foram em 7 zonas, para cada uma das zonas foram atribuídos valores dos seguintes parâmetros: espessura do aquífero, condutividade hidráulica e produtividade específica, com base na literatura (MENDONÇA, 2001) e em testes de bombeamento de poços (COGERH, 2009). Além dos parâmetros relacionados as zonas do grid, também foram incluídos o nível potenciométrico inicial calculado através de interpolação com dados dos poços SIAGAS até o ano de 2012. E as demandas de água superficial e subterrâneas obtidas dos dados de outorga.

A terceira etapa do estudo consistiu na avaliação da performance do modelo, para esta etapa existem três procedimentos: análise de sensibilidade, calibração e validação. Para análise de sensibilidade foram utilizados dados de vazão observada, posteriormente, através do método de Morris (WHITE et al., 2020) foi testada a sensibilidade de 60 parâmetros agrupados em 7 grupos. A calibração foi realizada em escala mensal com os dados de vazão para o período de 2009 a 2020, com 3 anos de aquecimento, através do método iterativo ensemble smooth – iES. O procedimento de validação foi realizado para o período de 1990 a 2003. A métrica estatística utilizada para avaliar o desempenho do modelo para vazão foi o índice Nash-Stucliff (NSE) e para avaliar o nível potenciométrico foi o erro médio absoluto (MAE) (MORIASI et al., 2007). Os procedimentos da terceira etapa foram feitos com o PEST++ (WHITE et al., 2020).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O modelo hidrológico SWAT+ dividiu a bacia hidrográfica do rio Batateiras em 24 sub-bacias e gerou 3660 unidades de resposta hidrológica. A análise de sensibilidade apresenta como resultado os parâmetros mais sensíveis na estimativa da vazão. No presente estudo os seis parâmetros mais sensíveis, em ordem, foram: percolação, coeficiente de *manning*, armazenamento máximo capilar, recarga zona 5, recarga zona 6 e o fator de compensação de evapotranspiração da água no solo. A performance do modelo para simular vazão é apresentada pela figura 1 através do hidrograma chuva vazão com a vazão simulada e observada.

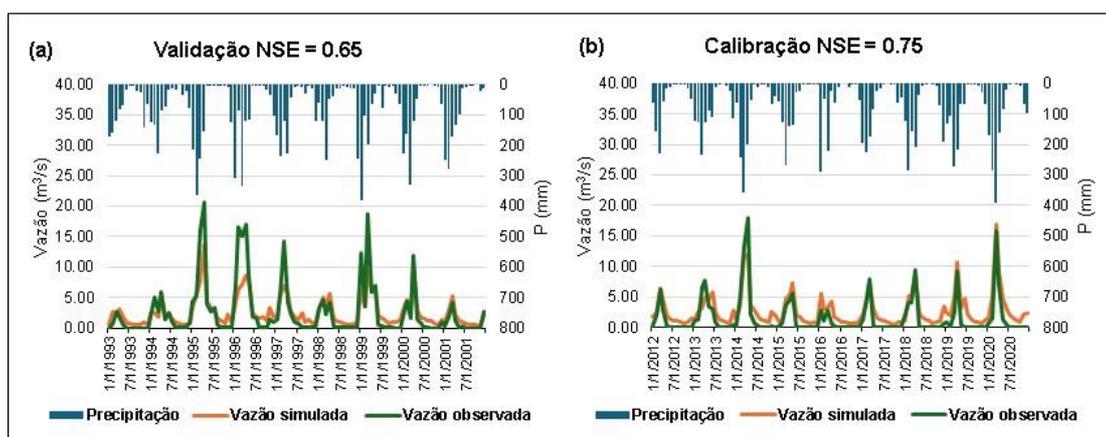


Figura 1 – Performance do modelo SWAT+ *gflow*. (a) Período de validação. (b) Período de calibração.

Conforme Moriasi et al. (2007) a performance da simulação para o período de calibração é considerada boa e para o período de validação é considerada satisfatória. No que diz respeito a performance da simulação para fluxos subterrâneos, sete poços da rede RIMAS com monitoramento de nível estático foram selecionados (SGB, 2024). A figura 2 apresenta o mapa com o a distribuição dos poços e o seu respectivo erro médio absoluto (MAE) e o mapa do nível potenciométrico simulado para dezembro de 2020.

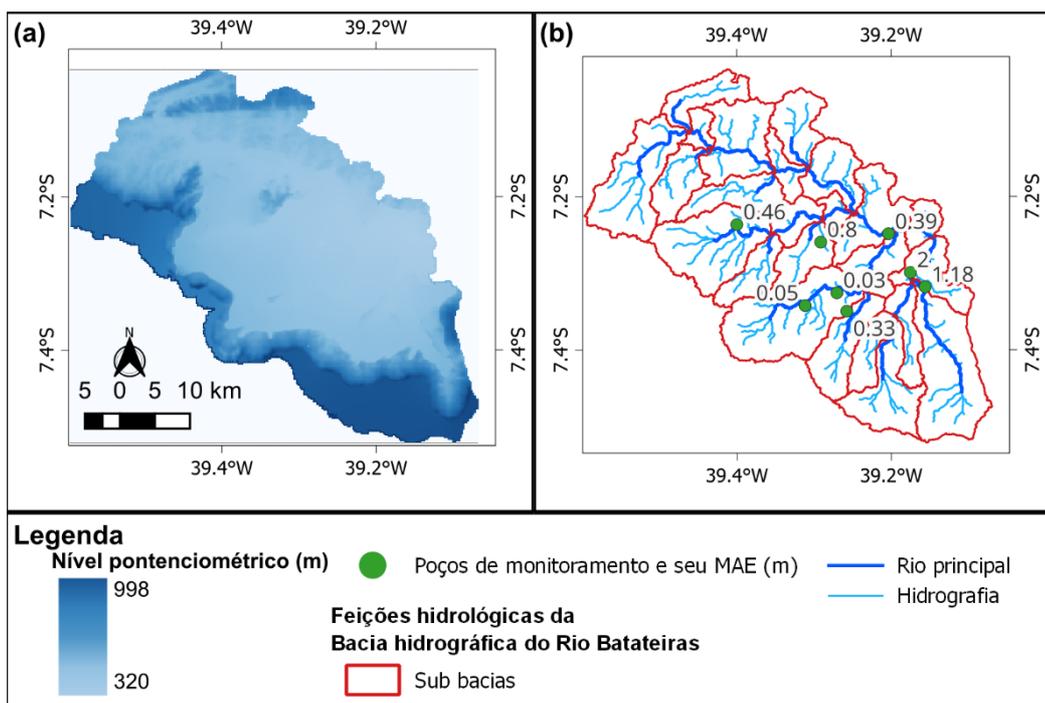


Figura 2 – Performance da simulação dos fluxos subterrâneos (a) Nível potenciométrico. (b) Feições hidrológicas e poços com o MAE (m).

De acordo com Abbas et al. (2024) para considerar os fluxos subterrâneos com boa performance o erro médio absoluto deve variar de -2,0 a 2,0 m. No presente estudo o erro médio absoluto medido anualmente de 2010 a 2020, variou de 0,03 a 2,0 m. Logo, de acordo com as métricas estatísticas NSE e MAE, o modelo SWAT+*gwflow* simulou de forma satisfatória os fluxos hidrológicos superficiais e subterrâneos.

4. CONCLUSÕES

O presente estudo consistiu na estimativa de fluxos de água superficial e subterrânea. De acordo com as métricas estatísticas selecionadas para avaliar, NSE e MAE, analisando a performance da vazão e do nível potenciométrico, o modelo utilizado obteve um bom desempenho. Ainda assim, existem algumas limitações como por exemplo uso de grid estruturado, não estima considerando o manejo agrícola e não estima volume de água de aquíferos confinados. Tais limitações, não necessariamente garantiriam uma melhor performance do modelo. Além disso, uma vez que o modelo possui uma boa performance a simulação dos fluxos representa as condições físicas da bacia hidrográfica próximas da realidade. Com isso, o modelo SWAT+*gwflow*, através da simulação de cenários pode ser utilizado como ferramenta para gestão de recursos hídricos em futuros estudos.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBAS, S. A.; BAILEY, R. T.; WHITE, J. T.; ARNOLD, J. G.; WHITE, M. J.; ČERKASOVA, N.; GAO, J. (2024). A framework for parameter estimation, sensitivity analysis, and uncertainty analysis for holistic hydrologic modeling using SWAT+. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 28, n. 1, p. 21-48, 2024.
- ACSELRAD, H. **Conflitos Ambientais no Brasil**. Rio de Janeiro: Relume Dumará, Fundação Heinrich Boll, 2004. v.1.
- BAILEY, R. T.; BIEGER, K.; ARNOLD, J. G.; BOSCH, D. D. (2020). A new physically-based spatially-distributed groundwater flow module for SWAT+. **Hydrology**, v.7, n.4, p. 1-23, 2020.
- BIEGER, K.; ARNOLD, J. G.; RATHJENS, H.; WHITE, M. J.; BOSCH, D. D.; SRINIVASAN, R. Introduction to SWAT+, a completely restructured version of the soil and water assessment tool. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 53, n. 1, p. 115-130, 2017.
- COGERH Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Ceará. **Plano de Monitoramento e Gestão dos Aquíferos da Bacia Sedimentar do Araripe 2009**. Disponível em: <https://portal.cogerh.com.br/wp-content/uploads/pdf/coletanea2010/Plano-Monitoramento-Gestao-Aquiferos-Bacia-Araripe.pdf>, Acesso: Setembro de 2024.
- MENDONÇA L. A. R. **Recursos hídricos da chapada do Araripe**. 2001. Tese de doutorado. Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brazil
- SBG. Serviço Geológico Brasileiro. **SIAGAS – Sistema de Informações de Águas Subterrâneas**. Acesso em Setembro de 2024 disponível em: <https://siagasweb.sgb.gov.br/layout/>
- PETERS, D. P.; BESTELMEYER, B. T.; HERRICK, J. E.; FREDRICKSON, E. L.; MONGER, H. C.; HAVSTAD, K. M. Disentangling complex landscapes: new insights into arid and semiarid system dynamics. **BioScience**, v. 56, n. 6, p. 491-501, 2006.
- MARENCO, J. A.; BERNASCONI, M. Regional differences in aridity/drought conditions over Northeast Brazil: present state and future projections, **Climatic Change**, v. 1, n. 129, p. 104-115, 2015.
- MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007.
- RENNA CAMACHO, C.; GETIRANA, A.; ROTUNNO FILHO, O. C.; MOURÃO, M. A. A. Large-Scale Groundwater Monitoring in Brazil Assisted With Satellite-Based Artificial Intelligence Techniques. **Water Resources Research**, v. 59, n. 9, 2023.
- WHITE, J.; HUNT, R.; FIENEN, M.; DOHERTY, J. Approaches to Highly Parameterized Inversion: PEST++ Version 5, a Software Suite for Parameter Estimation, Uncertainty Analysis, Management Optimization and Sensitivity Analysis, **US Geological Survey Techniques and Methods**, v. 7, n. 26, 2020.