



I CONGRESSO PERNAMBUCANO DE RECURSOS HÍDRICOS

Água para o Desenvolvimento
Recife, 24, 25 e 26 de março de 2026

Modelagem hidrológica e de qualidade da água integrada a geoprocessamento em nuvem: uma abordagem com Python e Google Earth Engine para uma bacia do nordeste brasileiro

Sheylane Regina Santos da Luz Machado Lira¹; Jean Firmino Cardoso², Ana Carolina dos Santos Reis³, Rutineia Tassi⁴, Antônio Celso Dantas Antonino⁵ & Artur Paiva Coutinho⁶

Palavras-chave: Modelagem Hidrológica; Python; Google Earth Engine; Qualidade da Água; Semiárido.

INTRODUÇÃO

A gestão dos recursos hídricos no Nordeste brasileiro impõe desafios complexos, exacerbados pela intermitência dos regimes fluviais e pela escassez hídrica característica do semiárido e do agreste. A água, elemento vital para a garantia da segurança alimentar, a manutenção dos ecossistemas e para o desenvolvimento socioeconômico, tem sua disponibilidade e qualidade governadas por interações dinâmicas entre o ciclo hidrológico e o uso do solo. Conforme estabelece a Lei Federal nº 9.433/97, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, o uso prioritário da água em situações de escassez é o consumo humano e a dessedentação de animais (Brasil, 1997). No entanto, a crescente demanda para fins agropecuários e industriais, somada à urbanização desordenada, tem gerado conflitos de uso e degradação ambiental nas bacias hidrográficas da região.

A qualidade da água reflete a saúde da bacia e é frequentemente comprometida por atividades antrópicas que alteram o uso da cobertura vegetal e impermeabilizam o solo. Estudos apontam que a supressão de vegetação nativa reduz a infiltração e aumenta o escoamento superficial, acelerando processos erosivos e o transporte de poluentes (Caldeira; Lima, 2020). Em áreas rurais, o uso intensivo de fertilizantes contribui para a contaminação por nutrientes, enquanto em áreas urbanas, o lançamento de efluentes domésticos sem tratamento adequado eleva as cargas de matéria orgânica, resultando na eutrofização dos corpos d'água (Rocha; Magalhães; Silveira, 2022).

Para compreender e mitigar esses impactos, o uso de modelos hidrológicos como o Soil and Water Assessment Tool (SWAT) tem se mostrado eficaz. Tradicionalmente, tais aplicações dependem de interfaces desktop e processamento local. Contudo, a evolução das geotecnologias permite hoje a integração de grandes volumes de dados através da computação em nuvem. A presente proposta visa refazer a análise hidrológica e de qualidade da água, originalmente aplicada à Bacia do Rio Ipojuca, adaptando-a para outra bacia do Nordeste através de uma arquitetura computacional baseada em Python, Google Colab e Google Earth Engine (GEE).

A escolha da Bacia do Rio Capibaribe justifica-se por sua importância estratégica, uma vez que abrange desde o polo industrial têxtil no Agreste até a densa urbanização da

¹) Universidade Federal de Pernambuco. Av. Prof. Luiz Freire, 1000 - Cidade Universitária, Recife – PE. sheylane.luz@ufpe.br

²) Universidade Federal de Pernambuco. Av. Prof. Luiz Freire, 1000 - Cidade Universitária, Recife – PE. jean.firmino@ufpe.br

³) Universidade Federal de Santa Maria, Av. Roraima nº 1000 Cidade Universitária - Camobi, Santa Maria – RS. reis.ana@acad.ufsm.br

⁴) Universidade Federal de Santa Maria, Av. Roraima nº 1000 Cidade Universitária - Camobi, Santa Maria – RS. ruti@ufsm.br

⁵) Universidade Federal de Pernambuco. Av. Prof. Luiz Freire, 1000 - Cidade Universitária, Recife – PE. antonio.antonino@ufpe.br

⁶) Universidade Federal de Pernambuco. Av. Prof. Luiz Freire, 1000 - Cidade Universitária, Recife – PE. arthur.coutinho@ufpe.br

Região Metropolitana do Recife. Essa abordagem busca garantir maior agilidade, reprodutibilidade e capacidade de processamento de séries históricas longas, capaz de avaliar de forma robusta as correlações entre as mudanças no uso do solo, monitoradas pelo MapBiomas, e os parâmetros físico-químicos da água nesta bacia.

METODOLOGIA

A metodologia proposta fundamenta-se na transição do fluxo de trabalho tradicional, baseado em interfaces desktop como o QGIS e o sistema SUPeR, para uma arquitetura de programação em nuvem, preservando as equações governantes e a base física do modelo SWAT. O estudo é aplicado à Bacia do Rio Capibaribe (PE) e abrange um período de análise de 35 anos (1985 a 2020).

Aquisição e Processamento de Dados em Nuvem

A caracterização fisiográfica e a delimitação da bacia são realizadas no ambiente Google Earth Engine (GEE), a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE) da missão SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) com resolução espacial de 30 metros. A rede de drenagem e as sub-bacias são geradas por meio de algoritmos de direção de fluxo implementados via API do GEE integrada ao Python, através das bibliotecas *geemap* e *pysheds*. Os dados pedológicos necessários para a parametrização dos solos são integrados a partir do banco de dados de solos do Brasil da EMBRAPA.

As séries temporais de uso e cobertura do solo são extraídas da Coleção 7.1 do Projeto MapBiomas. Diferente do processamento manual em SIG, as imagens anuais são acessadas diretamente no catálogo do GEE, o que permite o cálculo automatizado das transições entre classes. Para a entrada de dados meteorológicos, utilizou-se a precipitação diária da coleção CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data) e variáveis de temperatura e umidade da reanálise ERA5-Land. A validação e o suporte hidrológico são subsidiados por séries históricas de vazão extraídas da Rede Hidrometeorológica Nacional da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e da Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC).

Modelagem Hidrológica Computacional

O ciclo hidrológico é simulado através de scripts em Python que reproduzem as equações do SWAT. O balanço hídrico para cada Unidade de Resposta Hidrológica (URH) é calculado diariamente, fundamentado na conservação de massa, conforme a Equação 1 (Mankin; Srinivasan; Arnold, 2010):

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

Sendo: SW_t representa o conteúdo final de água no solo; SW_0 o conteúdo inicial; t o tempo em dias; R_{day} a precipitação; Q_{surf} o escoamento superficial; E_a a evapotranspiração; W_{seep} a percolação; e Q_{gw} o fluxo de retorno. O escoamento superficial (Q_{surf}) é estimado pelo método da Curva-Número (SCS-CN), cujos parâmetros são atribuídos dinamicamente com base nos mapas de uso do solo processados. A evapotranspiração potencial é calculada pelo método de Penman-Monteith, utilizando as bibliotecas científicas do Python (*scipy*, *pandas*) para processar as séries temporais climáticas.

Estimativa de Qualidade da Água

A qualidade da água é modelada estimando-se a produção de sedimentos e o transporte de nutrientes (Nitrogênio e Fósforo). A produção de sedimentos é calculada para cada evento de chuva através da Equação Universal de Perda de Solo Modificada (MUSLE), descrita na Equação 2 (Williams; Berndt, 1977):

$$sed = 11,8 \cdot (Q_{surf} \cdot q_{pico} \cdot area_{URH})^{0.56} \cdot K \cdot C \cdot P \cdot LS \cdot CFRG \quad (2)$$

Onde *sed* é a produção de sedimentos (toneladas); q_{pico} é a vazão de pico; *K* é a erodibilidade do solo; *C* o fator de manejo; *P* o fator de práticas conservacionistas; *LS* o fator topográfico; e *CFRG* o fator de fragmentos grosseiros. Estes fatores são espacializados e calculados matricialmente no ambiente computacional.

O transporte de nutrientes é associado ao escoamento superficial e à erosão. A carga de nitrato transportada pelo escoamento (NO_{3surf}) é dada pela Equação 3:

$$NO_{3surf} = \beta_{NO_3} \cdot conc_{NO_3,móvel} \cdot Q_{surf} \quad (3)$$

De forma análoga, o transporte de fósforo solúvel (P_{surf}) é calculado pela Equação 4:

$$P_{surf} = \frac{P_{solution,surf} \cdot Q_{surf}}{\rho_b \cdot depth_{surf} \cdot k_{d,surf}} \quad (4)$$

Análise de Correlação de Pearson

Para avaliar a relação entre as mudanças no uso do solo e os parâmetros de qualidade da água, aplica-se o Teste de Correlação de Pearson. A matriz de correlação é gerada utilizando a biblioteca *scipy.stats* do Python, substituindo softwares estatísticos externos. O coeficiente de correlação (*r*) é calculado segundo a Equação 5:

$$r = \frac{\sum(x - m_x)(y - m_y)}{\sqrt{\sum(x - m_x)^2 \sum(y - m_y)^2}} \quad (5)$$

Este coeficiente permite quantificar a força e a direção da associação linear entre as variáveis de uso da terra (ex: área de pastagem, área urbana) e as variáveis hidrológicas (ex: vazão, carga de sedimentos, concentração de nutrientes), considerando estatisticamente significativos os resultados com valor-*p* < 0,05.

RESULTADOS ESPERADOS

A aplicação da metodologia computacional na Bacia do Rio Capibaribe deve evidenciar dinâmicas de uso do solo e impactos hidrológicos compatíveis com aqueles descritos na literatura para o Agreste e o Litoral pernambucano. Espera-se que a análise das séries temporais do MapBiomias (1985–2020) revele uma transformação significativa da paisagem.

No âmbito hidrológico, projeta-se que as simulações indiquem alterações no balanço hídrico regional, associadas ao aumento das superfícies impermeáveis e à compactação dos solos. Esse cenário tende a refletir-se na elevação do escoamento superficial e na redução da infiltração, resultando em picos de vazão mais acentuados durante o período chuvoso e diminuição da vazão de base nos períodos de estiagem, o que pode intensificar a intermitência dos cursos d'água.

Em relação à qualidade da água, espera-se observar uma tendência de aumento das cargas de sedimentos ao longo das décadas simuladas, estimadas a partir da equação MUSLE, em especial em áreas com solos expostos ou submetidos a manejo inadequado. Assim,

projeta-se o incremento das cargas de Nitrogênio e Fósforo Total, transportados adsorvidos às partículas do solo e dissolvidos no escoamento superficial.

Por fim, a matriz de correlação de Pearson deve indicar associações positivas entre a expansão urbana e agropecuária e o aumento das concentrações de nutrientes, bem como associações negativas entre a cobertura florestal e a carga de poluentes, reforçando o papel da vegetação nativa na regulação hidrossedimentológica e na manutenção da qualidade ambiental da bacia.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A transposição da modelagem hidrológica para um ambiente de computação em nuvem, por meio da integração entre Python e Google Earth Engine (GEE), apresenta potencial como abordagem alternativa para a avaliação hidrológica da Bacia do Rio Capibaribe. Essa arquitetura pode contribuir para superar limitações do processamento local tradicional, ao possibilitar a análise de séries históricas extensas com maior flexibilidade, escalabilidade e reprodutibilidade, bem como apoiar análises de monitoramento hidrológico e de cenários de uso e ocupação do solo a partir da integração de bases como MapBiomas, CHIRPS e ERA5. Nesse contexto, a proposta tem potencial para subsidiar a investigação das relações entre mudanças no uso do solo, o balanço hídrico e a qualidade da água, estabelecendo uma base metodológica inicial passível de aprofundamento em estudos futuros e de aplicação no suporte à tomada de decisão em bacias hidrográficas do Nordeste brasileiro.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro do Programa de Formação de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – PRH-ANP, via PRH 48.1/UFPE (Processos ANP/FINEP N°48610.201019/2019-38 e FAPESP N°2024/10544-2), suportado com recursos provenientes do investimento de empresas petrolíferas qualificadas na Cláusula de P, D&I da Resolução ANP n° 50/2015. Agradece-se também a concessão da bolsa de mestrado (Processo N° 2025/17670-6). Ao FACEPE, pela concessão da bolsa de doutorado (Processo: IBPG-1453-3.00/21).

REFERÊNCIAS

BRASIL. **Lei nº 9.433**, de 8 de janeiro de 1997. Brasília: Governo Federal, 1997.

CALDEIRA, L. A. C.; LIMA, D. P. Drenagem urbana: uma revisão de literatura. **Eng. Sci.**, v. 8, n. 2, p. 1–9, 2020.

MANKIN, K.; SRINIVASAN, R.; ARNOLD, J. Soil and Water Assessment Tool (SWAT) Model: Current Developments and Applications. **Trans. ASABE**, v. 53, 2010.

ROCHA, M. de J. D.; MAGALHÃES, J. H. F.; SILVEIRA, C. da S. Aplicação do Curve Number como forma de avaliar os impactos nas mudanças no uso e ocupação do solo e na resposta hidrológica de uma pequena bacia semiárida. **Rev. AIDIS Ing. Cienc. Ambient.: Investig., desarro. práct.**, p. 67–85, 2022.

WILLIAMS, J. R.; BERNDT, H. D. Sediment Yield Prediction Based on Watershed Hydrology. **Trans. ASAE**, v. 20, n. 6, p. 1100–1104, St. Joseph, MI, 1977.