



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL**

DANIELA CASTAGNA

**EVAPOTRANSPIRAÇÃO E SWAT NO BRASIL: ANÁLISES CIENTOMÉTRICAS E
MODELAGEM HIDROLÓGICA EM UMA BACIA HIDROGRÁFICA NO SUL DA
AMAZÔNIA**

**CUIABÁ – MT
2026**

DANIELA CASTAGNA

**EVAPOTRANSPIRAÇÃO E SWAT NO BRASIL: ANÁLISES CIENTOMÉTRICAS E
MODELAGEM HIDROLÓGICA EM UMA BACIA HIDROGRÁFICA NO SUL DA
AMAZÔNIA**

Tese apresentada ao programa de Pós-Graduação em Física Ambiental da Universidade Federal de Mato Grosso como requisito parcial para a obtenção do título de Doutora em Física Ambiental.

Orientador: Dr. Adilson Pacheco de Souza

**CUIABÁ – MT
2026**

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

C346e Castagna, Daniela.

Evapotranspiração e SWAT no brasil: análises cientométricas e modelagem hidrológica em uma bacia hidrográfica no sul da Amazônia [recurso eletrônico] / Daniela Castagna. -- Dados eletrônicos (1 arquivo : 162 f., il., pdf). -- 2026.

Orientador: Adilson Pacheco de Souza.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Física, Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Cuiabá, 2026.

Modo de acesso: World Wide Web: <https://ri.ufmt.br>.

Inclui bibliografia.

1. sensoriamento remoto. 2. cientometria. 3. SWAT. I. Souza, Adilson Pacheco de, *orientador*. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
PRÓ-REITORIA DE ENSINO DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL

FOLHA DE APROVAÇÃO

TÍTULO: EVAPOTRANSPIRAÇÃO E SWAT NO BRASIL: ANÁLISES CIENTOMÉTRICAS E MODELAGEM HIDROLÓGICA EM UMA BACIA HIDROGRÁFICA NO SUL DA AMAZÔNIA

AUTORA: DOUTORANDA DANIELA CASTAGNA

Tese defendida e aprovada em **28 de ABRIL de 2026**.

COMPOSIÇÃO DA BANCA EXAMINADORA

1. PROF. DR. ADILSON PACHECO DE SOUZA [Presidente Banca / **Orientador**]

INSTITUIÇÃO: Universidade Federal de Mato Grosso

2. PROFA. DRA. DANIELA ROBERTA BORELLA [Examinadora Externa]

INSTITUIÇÃO: Universidade Federal de Mato Grosso

3. PROF. DR. FREDERICO TERRA DE ALMEIDA [Examinador Externo]

INSTITUIÇÃO: Universidade Federal de Mato Grosso

4. PROF. DR. DANIEL FONSECA DE CARVALHO [Examinador Externo]

INSTITUIÇÃO: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

5. PROF. DR. DONIZETE RITTER [Examinador Externo]

INSTITUIÇÃO: Universidade do Estado de Mato Grosso

SINOP, 28/ 04/2026.



Documento assinado eletronicamente por **MARCELO SACARDI BIUDES, Coordenador(a) de Programas de Pós-Graduação em Física Ambiental - IF/UFMT**, em 01/05/2026, às 11:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Daniela Roberta Borella, Usuário Externo**, em 01/05/2026, às 11:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **ADILSON PACHECO DE SOUZA, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 04/05/2026, às 15:05, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Donizete Ritter registrado(a) civilmente como DONIZETE RITTER, Usuário Externo**, em 05/05/2026, às 16:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **FREDERICO TERRA DE ALMEIDA, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 11/05/2026, às 18:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Daniel Fonseca de Carvalho, Usuário Externo**, em 12/05/2026, às 10:36, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufmt.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **9191327** e o código CRC **4B63C7A0**.

AGRADECIMENTOS

- À minha família pelo apoio incondicional de sempre, aos que estavam e estão comigo a muito tempo e em todos os momentos, meu companheiro Rogean, meus pais Derci e Maristela, meus irmãos Gabriel, Gustavo, Camila e Bárbara e minha grande amiga/irmã Luzinete.
- Ao Prof. Dr. Adilson Pacheco de Souza, pela orientação, dedicação e pelos valiosos ensinamentos ao longo desta pesquisa.
- Ao Prof. Dr. Frederico Terra de Almeida, pelos auxílios e ensinamentos compartilhados.
- Ao Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental da Universidade Federal de Mato Grosso e ao corpo docente, por compartilharem seus conhecimentos.
- Essa pesquisa foi realizada com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES).

RESUMO

A gestão dos recursos hídricos no Brasil, especialmente no bioma Amazônia, reconhecido como importante fonte de umidade que sustenta o ciclo hidrológico em grande parte da América do Sul, demanda o emprego de ferramentas de modelagem hidrológica consistentes e precisas. No entanto, a confiabilidade dessas ferramentas está diretamente condicionada à disponibilidade de dados de qualidade, fundamentais para a representação adequada do balanço hídrico. Nesse sentido, a escassez de dados observacionais *in situ* em extensas áreas da Amazônia configura um dos principais entraves à modelagem hidrológica, sobretudo quanto à estimativa da evapotranspiração, variável-chave e de difícil mensuração. Diante dessa limitação, o sensoriamento remoto surge como uma alternativa viável para suprir lacunas observacionais. Nesse contexto, o modelo hidrológico Soil and Water Assessment Tool (SWAT), aliado às estimativas de evapotranspiração (ET) derivadas de sensoriamento remoto, configura-se como uma abordagem promissora para a compreensão dos processos hidrológicos na região. Diante desse cenário, a hipótese desta tese é que a calibração multivariada, com o uso de dados de sensoriamento remoto, pode melhorar os resultados da modelagem na bacia hidrográfica do rio Peixoto de Azevedo. Essa tese investigou o uso integrado dessas abordagens, estruturando-se desde a análise do estado da arte até a aplicação dos dados de sensoriamento remoto na calibração do modelo SWAT. A avaliação do estado da arte foi realizada por meio de análise cientométrica de artigos encontrados nas bases indexadoras Scopus, Web of Science e Scielo. Observou-se o crescimento das produções ao longo dos anos, em ambos os casos. As análises cientométricas evidenciaram também uma assimetria geográfica na produção científica nacional, com forte concentração de estudos envolvendo o uso de estimativas de ET por sensoriamento remoto e de estudos que utilizam o SWAT nas regiões Sul e Sudeste, o que revela uma lacuna de investigações hidrológicas em escala de bacia no bioma Amazônia. A predominância do produto orbital MOD16A2 (sensor MODIS) nos trabalhos em que a área de trabalho se localizava no bioma da Amazônia. A análise cientométrica de artigos que utilizam o modelo SWAT no Brasil apontou forte colaboração internacional, especialmente com a Texas A&M University, o que favorece a transferência de conhecimento e o fortalecimento da capacidade técnica nacional. Contudo, observa-se baixa integração com os países da América do Sul, o que limita o desenvolvimento de estratégias regionais conjuntas para a gestão hídrica. Em termos temáticos, sobre o emprego do SWAT no Brasil, predominam pesquisas sobre o uso do solo e a produção de sedimentos, evidenciando lacunas em temas como a qualidade da água e as bacias urbanas. A ampliação dessas abordagens é dificultada pela complexidade do modelo, que exige um grande volume de dados e sólido conhecimento dos processos hidrológicos e biofísicos. Nesse cenário de lacunas espaciais, limitações de dados e desafios metodológicos, insere-se a etapa empírica desta pesquisa, com o objetivo de avaliar a aplicabilidade dessas ferramentas em escala de bacia no bioma da Amazônia. Com esse propósito, o modelo SWAT foi implementado na bacia hidrográfica do rio Peixoto de Azevedo, com o objetivo de avaliar o potencial do uso de dados de evapotranspiração obtidos por sensoriamento remoto na calibração do modelo hidrológico SWAT. Avaliou-se o potencial da calibração multivariada, que integra dados de vazão observada e diferentes estimativas de evapotranspiração de referência (ET_0), como estratégia para aprimorar a consistência física das simulações. Foram testados o produto de sensoriamento remoto MOD16A2 e os métodos terrestres de Camargo e de Penman-Monteith. Os resultados indicaram que a incorporação da ET_0 derivada do MOD16A2 comprometeu o desempenho do modelo, resultando em métricas estatísticas inferiores às obtidas na calibração univariada, baseada exclusivamente na vazão. Em contrapartida, a calibração multivariada baseada em métodos terrestres apresentou desempenho superior. Destaca-se o método de Penman-Monteith, que superou o mero ajuste estatístico do hidrograma. Ao atuar como condicionante físico e termodinâmico, esse método promoveu uma representação mais coerente das partições do balanço hídrico, reduzindo o risco de

compensações matemáticas nos compartimentos de armazenamento da bacia. Conclui-se que a hipótese da tese não se confirmou, pois o MOD16A2 não promoveu melhorias na modelagem da bacia. Contudo, a calibração multivariada pode apresentar resultados satisfatórios quando baseada em dados confiáveis e representativos das condições reais da bacia hidrográfica.

Palavras-chave: sensoriamento remoto; cientometria; SWAT.

ABSTRACT

Water resources management in Brazil, especially in the Amazon biome, which is recognized as an important source of moisture that sustains the hydrological cycle across much of South America, requires the use of consistent and accurate hydrological modeling tools. However, the reliability of these tools is directly conditioned by the availability of high-quality data, which is essential for the proper representation of the water balance. In this context, the scarcity of in situ observational data across extensive areas of the Amazon constitutes one of the main constraints on hydrological modeling, particularly regarding the estimation of evapotranspiration. This key variable is difficult to measure. Given this limitation, remote sensing emerges as a viable alternative to fill observational gaps. In this context, the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) hydrological model, combined with evapotranspiration (ET) estimates derived from remote sensing, represents a promising approach for understanding hydrological processes in the region. Within this framework, the hypothesis of this thesis is that multivariate calibration, incorporating remote sensing data, can improve modeling results in the Peixoto de Azevedo River basin. This thesis investigated the integrated use of these approaches, ranging from a state-of-the-art analysis to the application of remote sensing data in the calibration of the SWAT model. The state-of-the-art assessment was conducted through a scientometric analysis of articles indexed in the Scopus, Web of Science, and Scielo databases. A growth in scientific production over time was observed for both themes. The scientometric analyses also revealed a geographic asymmetry in national scientific production, with a strong concentration of studies involving remote sensing-based ET estimates and SWAT applications in the South and Southeast regions, highlighting a gap in watershed-scale hydrological investigations in the Amazon biome. A predominance of the MOD16A2 orbital product (MODIS sensor) was identified in studies conducted in the Amazon. Meanwhile, the scientometric analysis of studies applying the SWAT model in Brazil indicated strong international collaboration, particularly with Texas A&M University, which fosters knowledge transfer and strengthens national technical capacity. However, limited integration with other South American countries was observed, constraining the development of joint regional strategies for water resource management. In thematic terms, studies using SWAT in Brazil are predominantly focused on land use and sediment yield, revealing gaps in areas such as water quality modeling and urban watersheds. The expansion of these research areas is hindered by the complexity of the model, which requires large volumes of input data and a solid understanding of hydrological and biophysical processes. Within this context of spatial gaps, data limitations, and methodological challenges, the empirical stage of this research was developed, aiming to evaluate the applicability of these tools at the watershed scale in the Amazon biome. For this purpose, the SWAT model was implemented in the Peixoto de Azevedo River basin to assess the potential of using remote sensing-based evapotranspiration data in model calibration. The potential of multivariate calibration, integrating observed streamflow data and different reference evapotranspiration (ET_0) estimates, was evaluated as a strategy to improve the physical consistency of the simulations. The MOD16A2 remote sensing product and the Camargo and Penman-Monteith methods were tested. The results indicated that incorporating ET_0 derived from MOD16A2 compromised model performance, yielding statistical metrics inferior to those obtained through univariate calibration based solely on streamflow. In contrast, multivariate calibration based on ground-based methods showed superior performance. The Penman-Monteith method stood out as the most robust approach, going beyond simple statistical fitting of the hydrograph. By acting as a physical and thermodynamic constraint, this method provided a more coherent representation of water balance partitioning, reducing the risk of unrealistic compensations within basin storage components. It is concluded that the thesis hypothesis was not confirmed, as MOD16A2 did not improve the modeling performance of the basin. However, multivariate calibration can yield

satisfactory results when based on reliable data that are representative of the actual conditions of the watershed.

Keywords: Remote sensing; scientometric; SWAT.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Fluxograma de seleção de artigos que utilizem sensoriamento remoto para estimar a evapotranspiração no Brasil, para análise cientométrica.	29
Figura 2. Número de artigos publicados por ano, de 2001 a 2022, nas bases indexadoras Scopus, Web of Science e Scielo, sobre evapotranspiração por sensoriamento remoto no Brasil.	30
Figura 3. Periódicos científicos e seus fatores de impacto (IF) e CiteScore (CS), considerando, no mínimo, três artigos publicados nas bases indexadoras Scopus, Web of Science e Scielo, com o tema evapotranspiração por sensoriamento remoto no Brasil.	31
Figura 4. Número de artigos por autores e coautores com pelo menos cinco artigos e seus respectivos índices H (a) e suas redes de colaboração (b), vinculados a artigos publicados nas bases indexadoras Scopus, Web of Science e Scielo, com o tema evapotranspiração por sensoriamento remoto.	36
Figura 5. Diagrama de Sankey para as 20 principais instituições (à esquerda), 20 principais autores (no centro) e 20 principais países (à direita), vinculados a artigos publicados nas bases indexadoras Scopus, Web of Science e Scielo, sobre evapotranspiração por sensoriamento remoto no Brasil.	37
Figura 6. Número de artigos (a) e de redes de colaboração institucional (b) das 15 principais filiações (com ao menos um artigo de colaboração entre si) de autores e coautores com artigos publicados nas bases indexadoras Scopus, Web of Science e Scielo, sobre evapotranspiração por sensoriamento remoto no Brasil.	38
Figura 7. Distribuição dos artigos que utilizam o sensoriamento remoto para estimar a evapotranspiração no Brasil. Exclusão de grandes escalas espaciais: mundial, florestas tropicais, América do Sul, país, aquífero ou região.	39
Figura 8. Distribuição dos artigos que utilizam o sensoriamento remoto para estimar a evapotranspiração no Brasil, por bioma. Exclusão de artigos desenvolvidos em grandes escalas espaciais: mundial, florestas tropicais, América do Sul, país, aquífero ou região.	41
Figura 9. As 20 principais palavras-chave dos artigos, exceto as de “Evapotranspiration”, “Remote Sensing” e “Brazil”, de acordo com o bioma onde se localiza a área de estudo do artigo.	46
Figura 10. Fluxograma do delineamento da metodologia para a cientometria de artigos que utilizam a modelagem hidrológica SWAT no Brasil.	70
Figura 11. Resumo cientométrico dos 119 artigos avaliados que empregaram o modelo SWAT em pesquisas sobre recursos hídricos no Brasil.	71

Figura 12. Número de artigos publicados ao longo dos anos que utilizaram ou abordaram o modelo SWAT no Brasil, indexados na Scopus e na Web of Science.....	71
Figura 13. Periódicos científicos: divisão entre nacionais e internacionais, distribuição dos artigos publicados e relação com a nacionalidade dos autores.....	72
Figura 14. Periódicos científicos com dois ou mais artigos publicados entre 2011 e 2024, com respectivos fatores de impacto (IF), CiteScore (CS), ano da primeira publicação do periódico (Year) e editora.....	74
Figura 15. Rede de colaboração entre autores que tenham pelo menos duas colaborações entre si. As linhas representam as ligações de colaboração entre os autores, e os círculos indicam o número de artigos em que cada autor está presente e sua importância nas redes de colaboração.	77
Figura 16. Rede de colaboração entre as 18 principais instituições que tenham pelo menos uma colaboração. As linhas representam as ligações de colaboração entre os autores, e os círculos indicam o número de artigos em que cada instituição está presente e sua importância nas redes de colaboração.	78
Figura 17. Rede de fluxo de colaboração entre países, de acordo com a nacionalidade das instituições dos autores e coautores dos 119 artigos.	80
Figura 18. Distribuição da localização das áreas de estudo dos artigos que utilizam a modelagem SWAT no Brasil.	83
Figura 19. Palavras-chave do autor que apareceram ao menos duas vezes nos artigos encontrados (foram excluídas as palavras-chave SWAT, SWAT model e hydrological modeling, pois suas ocorrências eram três vezes maiores do que as da terceira palavra-chave mais citada, o que acabava ofuscando as demais).	85
Figura 20. Exemplos de repetição no uso de dados de modelo digital de elevação (MDE) e do uso do solo por autores/artigos (1 artigo que apresenta dois valores para a área da BH se deve ao fato de que o artigo avaliou duas BHs).	88
Figura 21. Localização da bacia hidrográfica do rio Peixoto de Azevedo, assim como da estação meteorológica automática (EMA) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).	113
Figura 22. Mapa hipsométrico (à esquerda) e mapa de declividade (à direita), da bacia hidrográfica do rio Peixoto de Azevedo.	115
Figura 23. Localização das amostras de perfil de solos do Sistema de Informação de Solos Brasileiros (SiSB) da Embrapa (Mapa 1) e espacialização dos solos na BH do rio Peixoto de Azevedo (Mapa 2).	117

Figura 24. Mapa de cobertura e uso da terra da bacia hidrográfica do rio Peixoto de Azevedo, com códigos para o processamento desse dado no SWAT.	120
Figura 25. Localização das estações fluviométricas utilizadas para a estimativa da vazão líquida na bacia hidrográfica do rio Peixoto de Azevedo e fluxograma da metodologia de regionalização empregada nesse processo.....	123
Figura 26. Esquema de aplicação dos indicadores estatísticos para a evapotranspiração de referência ET_0	125
Figura 27. Esquema de aplicação dos indicadores estatísticos da vazão líquida.	126
Figura 28. Fluxograma do processo de simulação e calibração do modelo SWAT utilizado neste trabalho.	129
Figura 29. Gráficos da temperatura do ar média e de precipitação mensal e dos valores diários com o período de aquecimento das simulações no modelo SWAT, que foi de 01/01/2011 a 31/12/2013.	130
Figura 30. Precipitação e vazão líquida média mensal da bacia hidrográfica do rio Peixoto de Azevedo, considerando o período de 2011 a 2023 e o desvio padrão da precipitação.	132
Figura 31. Distribuição da evapotranspiração de referência original e normalizada pelo erro absoluto médio ao longo dos dias julianos, no período de 2011 a 2023.	133
Figura 32. Distribuição diária dos dados originais (à esquerda) e normalizados por Penman-Monteith (à direita) da evapotranspiração de referência, considerando o valor observado por Penman-Monteith e os estimados por Hargreaves-Samani, Camargo e MOD16A2. Assim como seus respectivos desempenhos estatísticos.	135
Figura 33. Distribuição dos dados mensais da evapotranspiração de referência, considerando os valores observados pelo método de Penman-Monteith e os valores estimados pelos métodos de Hargreaves-Samani, Camargo e MOD16A2 (normalizados), bem como seus respectivos desempenhos estatísticos.	137
Figura 34. Resumo dos resultados da simulação hidrológica da bacia hidrográfica do rio Peixoto de Azevedo, considerando os modelos de Penman-Monteith e de Hargreaves-Samani para a evapotranspiração de referência.	139
Figura 35. Evapotranspiração diária (mm), de acordo com os valores observados (calculados com base nos dados da estação meteorológica A906 – pelo método de Penman-Monteith) e simulados pelo modelo SWAT, com os modelos de Penman-Monteith e Hargreaves-Samani.	140
Figura 36. Vazão observada com base nas estações fluviométricas e na metodologia descrita acima, no período de aquecimento de 2011 a 2013. E vazões estimadas pela simulação do	

modelo SWAT, de acordo com os modelos de evapotranspiração de Penman-Monteith e de Hargreaves-Samani.....	142
Figura 37. Vazão líquida observada e cenários de vazão líquida calibrada: (A) apenas a vazão líquida; (B) vazão líquida e ET_0 pelo método de Penman-Monteith; (C) vazão líquida e ET_0 pelo método de Camargo, normalizado pelo método de Penman-Monteith; e (D) vazão líquida e ET_0 do produto MOD16A2, normalizado pelo método de Penman-Monteith.	146
Figura 38. Correlação de Sperman ¹ , entre a (a) precipitação e a vazão líquida observada na bacia hidrográfica do rio Peixoto de Azevedo; (b) precipitação e vazão líquida resultado da calibração univariada; (c) precipitação e vazão líquida resultado da calibração multivariada (vazão líquida + ET_0 pelo método de Camargo); (d) precipitação e vazão líquida multivariada (vazão líquida + ET_0 pelo método de Penman-Monteith) e (e) precipitação e vazão líquida multivariada (vazão líquida + ET_0 pelo método de MOD16A2).	150

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Artigos que apresentam número médio normalizado de citações por ano acima de 10, publicados nas bases indexadoras Scopus, Web of Science e Scielo, sobre evapotranspiração por sensoriamento remoto no Brasil.	32
Tabela 2. Número de citações por ano após a publicação, para os artigos que apresentam número médio normalizado de citações (CN) por ano acima de 10,0, publicados nas bases indexadoras Scopus, Web of Science e Scielo, com o tema evapotranspiração por sensoriamento remoto no Brasil (O ID do artigo pode ser verificado na Tabela 1).	34
Tabela 3. Artigos com média de citações normalizada por ano (CN) superior a 10, publicados nas bases de dados indexadoras Scopus e Web of Science, sobre o uso do SWAT no Brasil.	75
Tabela 4. Número de artigos das 18 principais instituições que tenham ao menos uma colaboração, apresentados na Figura 16.	79
Tabela 5. Relação entre as regiões hidrográficas brasileiras e o número de artigos com área de trabalho dentro de seus limites.	82
Tabela 6. Métodos de evapotranspiração utilizados nos artigos encontrados.	92
Tabela 7. Conjunto de dados de entrada para a modelagem da bacia hidrográfica do rio Peixoto de Azevedo.	114
Tabela 8. Parâmetros pedológicos exigidos pelo modelo SWAT.	117
Tabela 9. Parâmetros utilizados na análise de sensibilidade da vazão líquida observada na bacia hidrográfica do rio Peixoto de Azevedo.	127
Tabela 10. Resumo climático da estação meteorológica automática A906 no período de 2011 a 2023.	131
Tabela 11. Desempenho estatístico da simulação da ET_0 na modelagem SWAT, considerando o dado observado e os valores calculados pelo modelo de Penman-Monteith com base nos dados da estação meteorológica A906.	140
Tabela 12. Sensibilidade dos parâmetros avaliados na análise de sensibilidade.	143
Tabela 13. Valores calibrados para os diferentes métodos de calibração.	146
Tabela 15. Lista das amostras de perfil de solos do Sistema de Informação de Solos Brasileiros (SiSB) utilizados na modelagem.	159
Tabela 16. Variáveis e respectivos valores dos solos da bacia hidrográfica do rio Peixoto de Azevedo.	159
Tabela 17. Dados de ET_0 utilizados para a calibração da vazão líquida da bacia hidrográfica do rio Peixoto de Azevedo, considerando os anos de 2011, 2012 e 2013 para o aquecimento.	160

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALEXI – Atmosphere-Land Exchange Inverse
ANADEM - Modelo Digital de Terreno para a América do Sul
ANA – Agência Nacional de Águas
ASEBAL - Automated Surface Energy Balance Algorithm for Land
BH – Bacia Hidrográfica
BHPA – Bacia Hidrográfica do rio Peixoto de Azevedo
CAD - Capacidade de Água Disponível
CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CFSR – Climate Forecast System Reanalysis
CHIRPS – Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data
CMIP - Coupled Model Intercomparison Project
CN – Citação Normalizada
DAEE - Departamento de Águas e Energia Elétrica
DDS – Dynamically Dimensioned Search
EMA – Estação Meteorológica Automática
EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPAGRI – Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina
ESALQ - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"
ET – Evapotranspiração
ET₀ – Evapotranspiração de Referência
EVI - Enhanced Vegetation Index
FAO - Food and Agriculture Organization
FUNCEME – Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
GLEAM - Global Land Evaporation Amsterdam Model
GWLF – Generalized Watershed Loading Function
HEC-HMS – Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System
HRU - Hydrologic Response Unit
HS – Hargreaves-Samani
IAC – Instituto Agrônomo
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INCAPER - Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural
INMET – Instituto Nacional de Meteorologia
INPE – Instituto Nacional de Pesquisa Espacial
IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change
JCR – Journal Citation Reports
KGE - Kling-Gupta Efficiency
MBE - Mean Bias Error
MDE – Modelo Digital de Elevação
MDT – Modelo Digital de Terreno
METRIC - Mapping Evapotranspiration at High Resolution with Internalized Calibration
MDPI - Multidisciplinary Digital Publishing Institute
MODIS - Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer
NDWI – Normalized Difference Water Index
NDVI - Normalized Difference Vegetation Index
ODS - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONG - Organização Não Governamental
PM – Penman-Monteith
PPG – Programa de Pós-Graduação
RMSE – Root Mean Squared Error

SAFER – Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving
SAVI - Soil-Adjusted Vegetation Index
SCS-CN – Soil Conservation Service - Curve Number
SEBAL – Surface Energy Balance Algorithm for Land
SEBS - Surface Energy Balance System
SiBCS - Sistema Brasileiro de Classificação de Solos
SRTM – Shuttle Radar Topography Mission
SSEBop - Operational Simplified Surface Energy Balance
SSURGO - Soil Survey Geographic Database
STATSGO – State Soil Geographic Database
STSEB - Simplified Two-Source Energy Balance
SUPer – Sistema de Unidades de Resposta Hidrológica
SWAT – Soil and Water Assessment Tool
TRMM - Tropical Rainfall Measuring Mission
UFCE – Universidade Federal do Ceará
UFLA – Universidade Federal de Lavras
UFMT - Universidade Federal de Mato Grosso
UFPB – Universidade Federal da Paraíba
UFPE – Universidade Federal de Pernambuco
UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UFRN – Universidade Federal do Rio Grande do Norte
UFRPE – Universidade Federal Rural de Pernambuco
UFRRJ – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
UFV – Universidade Federal de Viçosa
UFSM – Universidade Federal de Santa Maria
UHE – Usina Hidrelétrica
UNESP - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"
UNEMAT – Universidade do Estado de Mato Grosso
USLE - Universal Soil Loss Equation
USDA-ARS - United States Department of Agriculture- Agricultural Research Service
USDA/NRCS - United States Department of Agriculture/ Natural Resources Conservation Service
USP – Universidade de São Paulo
WXGEN - Weather Generator

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	21
Referências bibliográficas	22
1.1. Objetivo Geral.....	24
1.2. Objetivos Específicos	24
2. ARTIGO 01: EVAPOTRANSPIRAÇÃO POR SENSORIAMENTO REMOTO NO BRASIL E NO BIOMA AMAZÔNIA: ANÁLISE CIENTOMÉTRICA E PERSPECTIVAS PARA APLICAÇÕES EM ESTUDOS AGROAMBIENTAIS.....	25
2.1. Introdução	26
2.2. Material e métodos.....	28
2.3. Resultados.....	30
2.4. Discussão	39
2.4.1. Produção científica sobre evapotranspiração por sensoriamento remoto no Brasil por regiões e biomas brasileiros	39
2.4.2. Produção científica sobre evapotranspiração por sensoriamento remoto no Brasil nas instituições científicas e na Pós-Graduação Stricto Sensu.....	42
2.4.3. Aplicações da evapotranspiração por sensoriamento remoto no Brasil	44
2.4.4. Principais metodologias de sensoriamento remoto para estimativa da evapotranspiração no Brasil”	47
2.5. Conclusão.....	50
2.6. Referências bibliográficas.....	51
APÊNDICE A.....	59
APÊNDICE B	60
3. ARTIGO 02: SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL (SWAT) NO BRASIL: ANÁLISE DAS PESQUISAS APLICADAS AO CONHECIMENTO, USO E CONSERVAÇÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS NACIONAIS.....	65
3.1. Introdução	66
3.2. Material e métodos.....	69
3.3. Resultados.....	70

3.4.	Discussão	81
3.4.1.	Distribuição da produção científica sobre uso do modelo SWAT no Brasil	81
3.4.2.	Objetivos dos artigos	84
3.4.3.	Bases de dados de entrada	87
3.4.4.	Limitações e proposições.....	93
3.4.5.	Artigos publicados de outubro de 2024 e dezembro de 2025.....	94
3.5.	Conclusão.....	95
3.6.	Referências bibliográficas.....	96
	APÊNDICE A.....	105
4.	ARTIGO 03: CALIBRAÇÃO MULTIVARIADA DO SWAT (SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL) EM BACIA HIDROGRÁFICA NO SUL DA AMAZÔNIA	109
4.1.	Introdução	110
4.2.	Material e métodos.....	112
4.2.1.	Modelagem hidrológica.....	113
4.2.1.1.	Modelo Digital de Terreno (MDT)	114
4.2.1.2.	Pedologia.....	116
4.2.1.3.	Cobertura e uso da terra	119
4.2.1.4.	Dados climáticos	120
4.2.2.	Dados de vazão.....	122
4.2.3.	Desempenho estatístico	123
4.2.4.	Análise de sensibilidade e calibração	126
4.3.	Resultados.....	129
4.3.1.	Características climáticas	129
4.3.2.	Evapotranspiração	132
4.3.3.	Simulação	138
4.3.4.	Análise de sensibilidade e calibração	142
4.4.	Discussão	147

4.5.	Conclusão.....	152
4.6.	Referências bibliográficas.....	153
5.	CONCLUSÃO GERAL	162

1. INTRODUÇÃO GERAL

A crescente demanda por água, decorrente do aumento populacional, da expansão agrícola e do desenvolvimento industrial, impõe desafios à sustentabilidade dos recursos hídricos (FAO, 2012; Peixoto; Soares; Ribeiro, 2022; Santos; Carvalho; Martins, 2023; ANA, 2025). A garantia da segurança hídrica requer o monitoramento e a compreensão da dinâmica hidrológica, a fim de subsidiar estratégias eficientes de gestão da disponibilidade e da qualidade da água. Nesse contexto, a representação acurada dos processos físicos que ocorrem em bacias hidrográficas, por meio de modelos computacionais, torna-se uma ferramenta essencial para o planejamento adaptativo e sustentável (Silva et al., 2021; Marques; Veras; Rodriguez, 2022).

No âmbito da simulação hidrológica, a quantificação dos componentes do balanço hídrico constituiu um elemento central para a representação adequada do sistema hidrológico. A evapotranspiração (ET) é a transferência da água para a atmosfera por meio da evaporação do solo e da transpiração vegetal e destaca-se como onexo vital entre a superfície terrestre e a atmosfera (Allen et al., 2006). No ciclo hidrológico, a ET define a quantidade de água que retorna à atmosfera e influencia diretamente a recarga de aquíferos e a vazão líquida dos rios (Tucci, 2014; Marengo et al., 2018).

A estimativa acurada da ET em bacias hidrográficas tropicais ainda constitui um desafio científico e operacional. Embora modelos físico-matemáticos consagrados, como o de Penman-Monteith, forneçam estimativas robustas em escala local, sua aplicação é frequentemente limitada pela baixa densidade de estações meteorológicas, especialmente em regiões remotas. Nesse contexto de escassez de dados *in situ*, o sensoriamento remoto consolida-se como alternativa estratégica, ao possibilitar o monitoramento contínuo e espacialmente distribuído da ET por meio de produtos orbitais, como MOD16 do sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) e GLEAM (Global Land Evaporation Amsterdam), bem como de modelos baseados no balanço de energia, a exemplo do SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) e do METRIC (Mapping Evapotranspiration at high Resolution with Internalized Calibration) (Bastiaanssen et al., 1998; Jung et al., 2019; Liu et al., 2020; Saatchi et al., 2021).

A incorporação dessas informações especializadas é relevante no âmbito da modelagem hidrológica distribuída. Para integrar variáveis climáticas, fisiográficas e de superfície e avaliar impactos hidrológicos em múltiplas escalas, o modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT) destaca-se internacionalmente como uma ferramenta de base física e semidistribuída. O SWAT representa a heterogeneidade da bacia hidrográfica por meio da subdivisão em

Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs), definidas por combinações homogêneas de tipo de solo, uso e cobertura da terra e classes de declividade, e a simulação também é fortemente condicionada pelas características climáticas locais. Como resultado, o modelo produz um amplo conjunto de variáveis hidrológicas e ambientais, permitindo, ainda, avaliar de forma integrada as respostas das bacias hidrográficas a diferentes cenários de mudanças no uso e na cobertura da terra e de mudanças climáticas (Neitsch; Arnold; Williams, 2011; Arnold et al., 2012; Abbaspour et al., 2019).

Apesar da versatilidade do modelo SWAT, a confiabilidade de suas simulações depende tanto do processo de calibração quanto da consistência e da qualidade dos dados observados. Tradicionalmente, o modelo é calibrado apenas com base em dados observados de vazão líquida. A calibração multivariada, que incorpora estimativas de ET derivadas de sensoriamento remoto junto aos dados de vazão, surge como uma fronteira científica para aprimorar a consistência física da modelagem e reduzir as incertezas inerentes ao balanço hídrico em regiões com baixa densidade de monitoramento (Franco; Oliveira; Bonumá, 2020; Ferreira et al., 2021; Dangol et al., 2023). Desse modo, essa tese parte da hipótese de que a calibração multivariada, aplicando dados de sensoriamento remoto aos de ET_0 , pode melhorar os resultados na modelagem da bacia hidrográfica do rio Peixoto de Azevedo.

Considerando a escassez de dados *in situ* no sul da Amazônia e a complexidade do bioma Amazônia, esta tese está estruturada em três artigos/capítulos complementares:

- Análise Cientométrica da ET: evapotranspiração por sensoriamento remoto no Brasil e no bioma Amazônia: análise cientométrica e perspectivas para aplicações em estudos agroambientais.
- Análise Cientométrica do Modelo SWAT no Brasil: Soil and Water Assessment Tool (SWAT) no Brasil: análise das pesquisas aplicadas ao conhecimento, uso e conservação dos recursos hídricos nacionais.
- Modelagem e Calibração Multivariada: Calibração multivariada do SWAT (Soil and Water Assessment Tool) em uma bacia hidrográfica no sul da Amazônia.

Referências bibliográficas

ABBASPOUR, K. C. *et al.* Global soil, land use, evapotranspiration, historical and future weather databases for SWAT Applications. **Scientific Data**, v. 6, n. 1, p. 263, 6 nov. 2019.

ANA – Agência Nacional de Águas. (2025). Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil. Brasília. Disponível em: <https://conjuntura-2025.webflow.io/>. Acesso em: 10 jan. 2026.

ALLEN, Richard. G. *et al.* **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. FAO - Irrigation and Drainage: Rome, n. 56; p. 300, 2006. Disponível em: <https://www.fao.org/4/x0490e/x0490e00.htm>. Acesso em: 15 jan. 2026.

ARNOLD, Jeffrey G. *et al.* **Soil and Water Assessment Toll: Input/Output Documentation, version 2012**. TX, USA: Texas Water Resources Institute Technical Report: College Station, 2012. Disponível em: <https://swat.tamu.edu/media/69296/swat-io-documentation-2012.pdf>. Acesso em: 15 jun. 2024.

DANGOL, Sijal *et al.* Multivariate Calibration of the SWAT Model Using Remotely Sensed Datasets. **Remote Sensing**, v. 15, n. 9, p. 2417, Jan. 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/15/9/2417>. Acesso em: 12 fev. 2025.

FAO. **Coping with water scarcity: an action framework for agriculture and food security**. Rome: FAO, 2012. Disponível em: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/e41cd021-c43a-460b-839e-c1abf8bd3f06/content>. Acesso em: 15 dez. 2025.

FERREIRA, Amanda do Nascimento *et al.* Evaluation of Evapotranspiration in Brazilian Cerrado Biome Simulated with the SWAT Model. **Water**, v. 13, n. 15, p. 2037, Jul. 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/13/15/2037>. Acesso em: 10 dez. 2025.

FRANCO, Ana Clara Lazzari; OLIVEIRA, Debora Yumi de; BONUMÁ, Nadia Bernardi. Comparison of single-site, multi-site and multi-variable SWAT calibration strategies. **Hydrological Sciences Journal**, v. 65, n. 14, p. 2376–2389, set. 2020. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/02626667.2020.1810252>. Acesso em: 10 nov. 2025.

MARQUES, Amanda Carneiro; VERAS, Carlos Eduardo; RODRIGUEZ, Daniel Andrés. Assessment of water policies contributions for sustainable water resources management under climate change scenarios. **Journal of Hydrology**, v. 608, p. 127690, 1 maio 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169422002657>. Acesso em: 15 out. 2025.

NEITSCH, Susan L.; ARNOLD, Jeff R.; WILLIAMS, J. R. **Soil and Water Assessment Tool: Theoretical Documentation Version 2009**. Texas A&M University, set. 2011. Disponível em: <https://swat.tamu.edu/media/99192/swat2009-theory.pdf>. Acesso em: 02 set. 2025.

PEIXOTO, Filipe da Silva; SOARES, Jamilson Azevedo; RIBEIRO, Victor Sales. Conflitos pela água no Brasil. **Sociedade & Natureza**, v. 34, p. e59410, 2022. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/sn/a/9zK6YFrTGYYmD6hJT3CNhzv/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 10 set. 2025.

SANTOS, Eleonora; CARVALHO, Milena; MARTINS, Susana. Sustainable Water Management: Understanding the Socioeconomic and Cultural Dimensions. **Sustainability**, v. 15, n. 17, p. 13074, Jan. 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/17/13074>. Acesso em: 03 ago. 2025.

SILVA, Fabio Leandro da *et al.* Gestão de recursos hídricos e manejo de bacias hidrográficas no Brasil: elementos básicos, histórico e estratégias. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 3, p. 1626–1653, 27 jul. 2021. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/248864>. Acesso em: 02 set. 2025.

1.1. Objetivo Geral

Avaliar a eficácia da calibração multivariada na modelagem do Soil and Water Assessment Tool (SWAT), considerando a vazão e a evapotranspiração estimadas com base em modelos *in situ* e em produtos de sensoriamento remoto, visando otimizar a representação dos processos físicos do balanço hídrico em uma bacia hidrográfica de transição amazônica.

1.2. Objetivos Específicos

- Identificar o produto de sensoriamento remoto mais comumente usado para estimativa de evapotranspiração dentro do bioma Amazônia;
- Caracterizar o uso do modelo hidrológico Soil and Water Assessment Tool (SWAT) no Brasil;
- Avaliar o potencial do uso de dados de evapotranspiração obtidos por sensoriamento remoto na calibração do modelo hidrológico SWAT na bacia hidrográfica do rio Peixoto de Azevedo.

2. ARTIGO 01: EVAPOTRANSPIRAÇÃO POR SENSORIAMENTO REMOTO NO BRASIL E NO BIOMA AMAZÔNIA: ANÁLISE CIENTOMÉTRICA E PERSPECTIVAS PARA APLICAÇÕES EM ESTUDOS AGROAMBIENTAIS.

Artigo publicado na revista Hydrology em 08 de março de 2024.

DOI: 10.3390/hydrology11030039

RESUMO

O bioma Amazônia é uma importante fonte de evapotranspiração (ET), devido à quantidade de corpos d'água com água disponível e à floresta equatorial, de altas taxas de transpiração, que ocupa sua área. A ET amazônica abastece os ciclos hidrológicos locais e regionais, fornecendo umidade para a precipitação em grande parte da América do Sul. Sabendo desta importância, estimar a ET amazônica torna o planejamento e a gestão da água mais eficazes. A estimativa da ET por sensoriamento remoto é uma ótima opção para as regiões amazônicas remotas, que impossibilitam a aferição in situ; apresenta menor custo e conta com modelos e produtos bem consolidados na ciência. Desta forma, sob a premissa de identificar o produto ou modelo de estimativa de evapotranspiração por meio do sensoriamento remoto mais utilizado no bioma Amazônia, foi realizada uma análise cientométrica, com buscas por documentos nas bases indexadoras Web of Science, Scielo e Scopus, com filtros para as terminologias "Evapotranspiration", "Remote Sensing" e "Brazil", publicados até o final de 2022, em inglês e no formato de artigo. Aplicando-se filtros, selecionaram-se 140 artigos, que foram submetidos à biblioteca bibliometrix do RStudio para análise cientométrica. As publicações dos artigos ocorreram entre 2001 e 2022, em 66 periódicos, com 600 autores e coautores, provenientes de 245 instituições. Ao especializar as áreas de trabalho dos artigos, verificou-se concentração nos limites do estado de São Paulo, com 21 artigos, enquanto a área do bioma Amazônia apresentou 18 artigos. Sobre os artigos alocados no bioma Amazônia, foi verificada tendência em trabalhos com temáticas voltadas a bacias hidrográficas, mudanças climáticas, El Niño e desmatamento. Também houve tendência para a utilização do produto MOD16, que integrou os métodos de 12 artigos. A utilização do produto MOD16 pode estar relacionada à sua resolução espacial, de 500 m, e às grandes escalas espaciais das áreas de trabalho dos artigos, fator que propicia o uso de menor resolução espacial.

Palavras-chave: Bibliometrix; bases de indexação; citações de artigos; ciências ambientais; programa de pós-graduação.

ABSTRACT

The Amazon biome is an important source of water vapor for the atmosphere, and evapotranspiration (ET) contributes to the local and regional hydrological cycle, providing humidity for a large part of Brazil and South America. Remote sensing (SR) has become a viable option for measuring and estimating ET, as there are already well-established products and models that can be applied on large spatial scales and in locations with low density of in situ (surface) monitoring. To identify the ET estimation product or model by SR that has been used in Brazil and can be used in the Amazon biome, a scientometric analysis was conducted. Searches for articles published in the Web of Science indexing databases, Scielo, and Scopus were performed using the terms "Evapotranspiration", "Remote Sensing", and "Brazil", up to and including 2022, and in English. Initially, 331 articles were found, and filters and qualitative analysis were applied to reduce the number to 140 articles, which were then subjected to

scientometric analysis using the Bibliometrix library in RStudio. Articles on the topic of "evapotranspiration by remote sensing in Brazil" were published between 2001 and 2022 in 66 journals, by 600 different authors and co-authors from 245 institutions. Most of these articles were developed in Brazil's Southeast and North (Amazon) regions. The 12 articles that studied ET by RS in the Amazon biome focused on river basins, climate change, El Niño, and deforestation, and used the MOD16 product.

Keywords: Bibliometrix; indexing bases; article citations; Environmental Sciences; Postgraduate Program.

2.1. Introdução

A evapotranspiração (ET) é o processo de transformação da água do estado líquido em vapor, que ocorre na superfície da Terra. É composta por dois processos: evaporação, que ocorre na superfície do solo e da água, e transpiração, que ocorre nas plantas. A ET é influenciada por fatores meteorológicos, como radiação solar, temperatura, umidade do ar e ventos, bem como por características do solo e da vegetação (Allen et al., 2006). No ciclo hidrológico, a ET é uma variável de grande importância, pois representa a quantidade de água que retorna à atmosfera e não contribui para a recarga de águas superficiais e subterrâneas nas bacias hidrográficas (Tucci, 2014). Portanto, a ET é um parâmetro importante para o planejamento e gestão dos recursos hídricos em diferentes escalas espaciais, tanto nos contextos hidroagrícolas quanto nos ambientais.

Em escala local, a ET pode ser obtida de forma direta por meio de lisímetros, do balanço hídrico do solo ou de medidas de fluxo de seiva (Allen et al., 2011; Reth et al., 2021), e de forma indireta por meio de modelos físico-matemáticos que utilizam variáveis meteorológicas para estimar a evapotranspiração de uma vegetação de referência (ET_0). Inúmeros modelos foram desenvolvidos para diferentes regiões climáticas e períodos de dados, visando à obtenção da ET_0 e, por meio de coeficientes de cultivo (K_c), à estimativa da evapotranspiração de outras superfícies vegetadas. No entanto, esses resultados de ET ficam restritos às áreas de representação das estações meteorológicas, particularmente escassas em regiões com maiores limitações de acesso e menor importância socioeconômica.

Em escala regional, como no contexto de florestas ou de bacias hidrográficas, a ET é um importante regulador do ciclo hidrológico local, regional e de mesoescala (Maeda et al., 2017; Marengo et al., 2018). Na Floresta Amazônica, por exemplo, o vapor de água evapotranspirado atinge a baixa atmosfera e é transportado pelos ventos alísios até a cordilheira dos Andes. Essa barreira física altera a direção da movimentação da massa de ar úmida,

encaminhando-a pela região continental da América do Sul, o que forma a Zona de Convergência Intertropical. Esse conjunto de fatores torna a ET da região amazônica essencial para o abastecimento hídrico de grande parte do continente Sul-Americano (Baker; Spracklen, 2019; Fassoni-Andrade et al., 2021).

Embora a ET seja um componente essencial do balanço hídrico e um parâmetro importante para a ciência, sua estimativa ainda apresenta desafios no bioma da Amazônia no Brasil. Isso ocorre porque as observações *in situ* são difíceis de manter, especialmente em locais remotos e de difícil acesso, além de serem restritas a pequenas distâncias dos locais de instalação de estações meteorológicas e de torres de fluxo (Allen et al., 2011).

O sensoriamento remoto pode ser uma opção para minimizar as dificuldades de obtenção da ET em escalas espaciais médias e grandes. Nesses casos, a ET pode ser obtida por meio de metodologias que combinam dados de sensoriamento remoto com dados de reanálise meteorológica, como os modelos MOD16 e GLEAM. O MOD16 é proveniente do sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), acoplado aos satélites TERRA e AQUA, e utiliza os princípios da equação de Penman-Monteith para estimar a evapotranspiração (Spera et al., 2016; Mariano et al., 2018; Liu et al., 2020). O modelo GLEAM (Global Land Evaporation Amsterdam) baseia-se em um conjunto de algoritmos que consideram os empregados na equação de Priestley-Taylor (Jung et al., 2019; Saatchi et al., 2021). A ET também pode ainda ser estimada por composição de modelos a partir de produtos de sensoriamento remoto (Chen; Liu, 2020; Bhattarai; Wagle, 2021), como é o caso dos modelos, Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) (Bastiaanssen et al., 1998; Angelini et al., 2021), Mapping Evapotranspiration at High Resolution with Internalized Calibration (METRIC) (Dhungel; Barber, 2018) e do Two Source Energy Balance (TSEB) (Bellvert et al., 2020; Cui; Song; Fan, 2021).

Estudos com a aplicação de modelos de estimativa de ET foram e vêm sendo desenvolvidos e aplicados em escala mundial (Javadian et al., 2020; Zhou et al., 2021), continental (Anderson et al., 2016; Moreira et al., 2019), a nível de bioma (Staal et al., 2020; Laipelt et al., 2021; Rodrigues et al., 2022), estados (Caioni et al., 2020; Biudes et al., 2022), bacias hidrográficas com diferentes áreas (Nóbrega et al., 2017; Paca et al., 2019; Santos et al., 2020a), em escalas espaciais pequenas como unidades experimentais (Oliveira et al., 2018; Teixeira et al., 2019) e em cenas específicas do satélite Landsat (Khand et al., 2017; Bosquilia et al., 2019). Assim, existe uma variedade de escalas espaciais de aplicação e de modelos e produtos utilizados para estimativa da ET por sensoriamento remoto, de forma que diversos trabalhos foram publicados comparando os métodos de estimativa entre si e com dados *in situ*,

visando identificar o(s) método(s) que permite(m) a(s) melhor(es) estimativa(s) da evapotranspiração (Baker; Spracklen, 2019; Melo et al., 2021; Paca et al., 2022; Ruhoff et al., 2022).

Considerando a diversidade de informações científicas disponíveis sobre as estimativas dos componentes do ciclo hidrológico, é oportuno identificar a produção de artigos sobre a estimativa de ET por sensoriamento remoto, avaliando sua evolução, as colaborações entre pesquisadores da área, sua distribuição espacial, os métodos mais utilizados e suas principais aplicações. A análise cientométrica é uma metodologia utilizada para realizar análises quantitativas de indicadores bibliométricos (artigos, citações, autores, periódicos, palavras-chave). Ela também permite identificar os cientistas que trabalham em determinada temática, os principais períodos de publicação e as lacunas temporais e regionais, indicando oportunidades de pesquisa que podem viabilizar o avanço científico do tema (Hood; Wilson, 2001; Mingers; Leydesdorff, 2015; Aria; Cuccurullo, 2017). Portanto, este estudo utiliza a cientometria para identificar os produtos de sensoriamento remoto mais comumente empregados para a estimativa de ET dentro do bioma Amazônia. Essas informações serão valiosas para futuros estudos sobre recursos hídricos em contextos agrícolas e ambientais.

2.2. Material e métodos

Os artigos selecionados eram completos e publicados em revistas indexadas nas bases de dados Scopus, Web of Science e Scielo. A estratégia de pesquisa dos metadados baseou-se na utilização dos termos “Evapotranspiration” AND “Remote sensing” AND “Brazil” em todos os campos de busca, para artigos publicados até 2022 e em língua inglesa. Nessa consulta, foram obtidos 112, 208 e 11 artigos, respectivamente, nas bases indexadoras Scopus, Web of Science e Scielo (Figura 1).

Os registros resultantes de cada base indexadora foram adicionados no RStudio com o uso do pacote bibliometrix que tem argumentos específicos para cada base indexadora, exceto para a Scielo. As informações referentes aos artigos indexados na Scielo foram extraídas na plataforma da Web of Science, pesquisando apenas os publicados nessa base indexadora. Posteriormente, os registros foram mesclados em um único quadro de dados com o argumento mergeDbSources do pacote bibliometrix e, removidos os duplicados com a lógica remove.duplicated. Deste modo, 84 de 331 artigos eram duplicados, visto que estavam indexados em mais de uma base, totalizando 247 artigos (Figura 1).

O quadro dos registros foi novamente filtrado de acordo com o DOI, sendo encontrados 18 artigos duplicados, dos quais dois não tinham DOI e dois eram artigos de revisão. Após a remoção dos artigos publicados, restaram 225 (Figura 1).

Em seguida, foi verificado manualmente se as áreas de pesquisa estavam no Brasil e se os produtos ou modelos de sensoriamento remoto empregados para estimar a evapotranspiração foram utilizados. Após esta análise, identificaram-se 140 artigos para análise cientométrica (Figura 1).

Figura 1. Fluxograma de seleção de artigos que utilizem sensoriamento remoto para estimar a evapotranspiração no Brasil, para análise cientométrica.



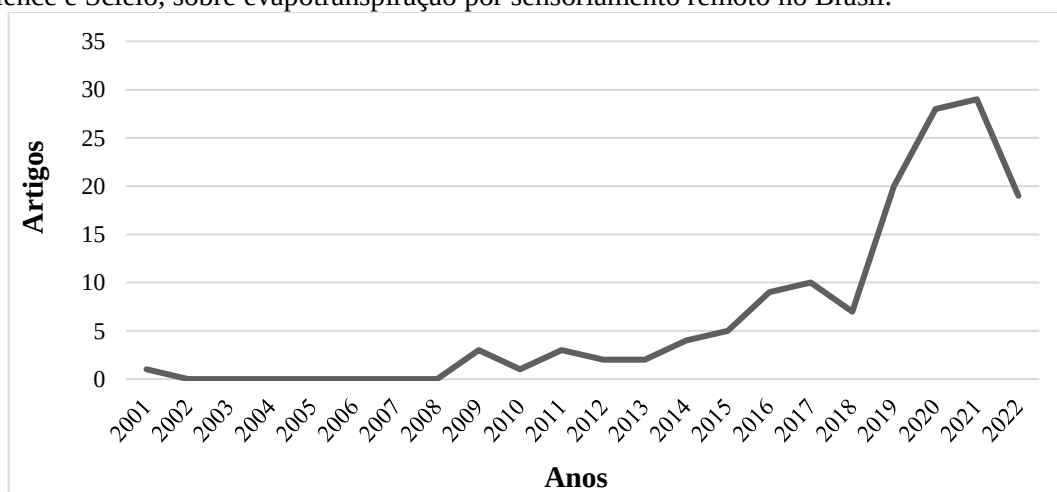
A fim de melhorar o processamento quantitativo dos dados, foi realizada uma revisão dos dados relativos aos nomes dos autores e às afiliações no quadro de registros (informações bibliométricas) dos 140 artigos. O objetivo da revisão foi manter a conformidade na forma de se referir os sobrenomes dos autores e suas respectivas afiliações institucionais. As análises posteriores foram realizadas com a ferramenta Biblioshiny, da biblioteca Bibliometrix, no RStudio.

Os artigos avaliados foram publicados entre 2001 e 2022. Para verificar o impacto dos artigos ao longo do período de publicação, foi calculada a média normalizada de citações por ano para cada artigo, obtida pela razão entre o número de citações do artigo e o tempo de publicação (Bezak et al., 2021).

2.3. Resultados

O número de publicações dos artigos cresceu ao longo dos anos, de modo que mais de 60% foram publicadas após 2019 (nos últimos quatro anos). O ano de 2021 foi o mais expressivo, com 20% do total de artigos publicados (Figura 2).

Figura 2. Número de artigos publicados por ano, de 2001 a 2022, nas bases indexadoras Scopus, Web of Science e Scielo, sobre evapotranspiração por sensoriamento remoto no Brasil.

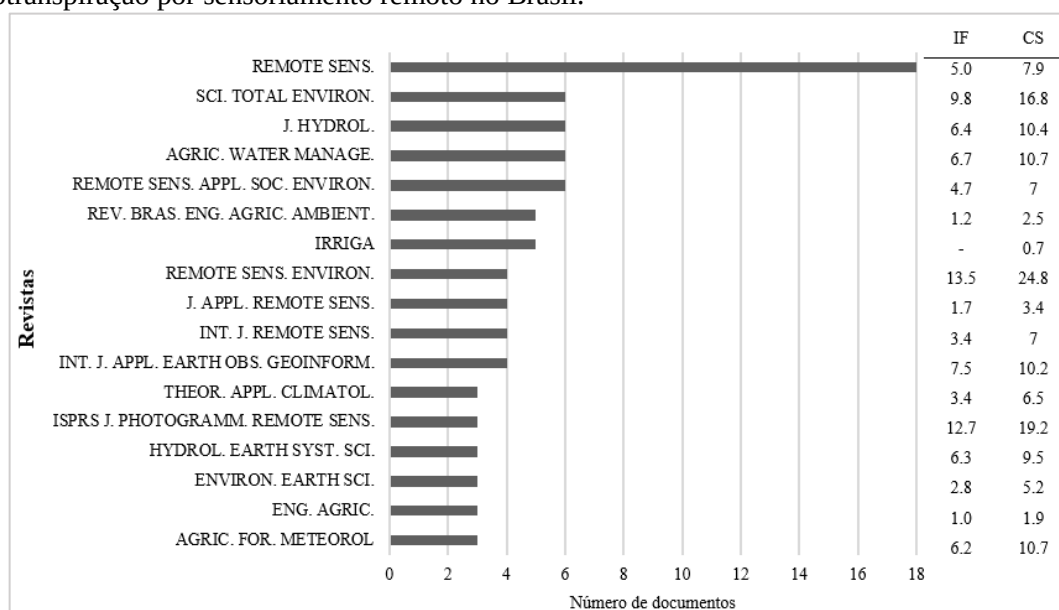


Os artigos foram publicados em 66 periódicos científicos (Figura 3). Desses, 49 publicaram 1 ou 2 artigos, enquanto 17 publicaram 3 ou mais artigos sobre o tema. Estes últimos representam 59,7% dos artigos avaliados neste estudo, sendo que apenas a revista Irriga (ISSN 1808-8546) não possui fator de impacto. Por outro lado, a revista mais recente é a Remote Sensing Applications: Society and Environment (ISSN 2352-9385), fundada em 2015. Ela tem CiteScore e fator de impacto elevados, quando comparada a revistas mais antigas. Essa revista,

da editora Elsevier, está indexada na Scopus e na Web of Science. Seu escopo é voltado para estudos de sensoriamento remoto, com ênfase em questões ambientais e sociais, incluindo estudos regionais e locais de significado global.

Os seguintes periódicos têm sensoriamento remoto como escopo principal de publicação: Remote Sensing of Environment (Remote Sens. Environ., 1970), ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing (Isprs J. Photogramm. Remote Sens., 1963), International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation (Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinform., 1999), todos publicados pela Elsevier; Journal of Applied Remote Sensing (J. Appl. Remote Sens., 2007), publicado pela SPIE; e Remote Sensing (Remote Sens., 2009), publicado pela MDPI. Todos esses periódicos estão indexados em Scopus e em Web of Science.

Figura 3. Periódicos científicos e seus fatores de impacto (IF) e CiteScore (CS), considerando, no mínimo, três artigos publicados nas bases indexadoras Scopus, Web of Science e Scielo, com o tema evapotranspiração por sensoriamento remoto no Brasil.



Além do sensoriamento remoto, os objetivos das publicações também são interdisciplinares, abrangendo meteorologia e climatologia. Exemplos são os artigos publicados nos periódicos Agricultural and Forest Meteorology (Agric. For. Meteorol., 1963), indexado pela Web of Science e pela Scopus, e Theoretical and Applied Climatology (Theor. Appl. Climatol., 1949), indexado pela Web of Science. Ambos são publicados pela Elsevier e pela Springer, respectivamente.

Outros dois periódicos também são relevantes para a área da hidrologia. O Journal of Hydrology (J. Hydrol., 1963) e o Hydrology and Earth System Sciences (Hydrol. Earth Syst. Sci., 1997) publicam artigos sobre ciclo hidrológico, modelagem hidrológica, bacias hidrográficas, gestão de recursos hídricos, entre outros. Ambos são indexados pela Scopus e

pela Web of Science, mas o Journal of Hydrology (J. HYDROL., 1963) é publicado pela Elsevier e o Hydrology and Earth System Sciences (HESS, 1997) pela EGU. O periódico Agricultural Water Management (Agric. Water Manage., 1978) tem foco na gestão dos recursos hídricos na agricultura, abrangendo também drenagem, modelagem hidrológica e gestão de bacias hidrográficas. É publicado pela Elsevier e indexado na Scopus e na Web of Science.

Além da Irriga, há dois periódicos brasileiros relevantes para as ciências agrárias: Engenharia Agrícola (Eng. Agric., 1972), publicada pela Associação Brasileira de Engenharia Agrícola (SBEA), e Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental (Rev. Bras. Eng. Agric. Ambient., 1997), publicada pela Editora da Universidade Federal de Campina Grande (EDUEFCG). Ambos são indexados nas bases de dados Scielo, Scopus e Web of Science.

Além dos periódicos com escopo específico, dois periódicos multidisciplinares também foram identificados: Environmental Earth Sciences (Environ. Earth Sci., 2009), publicado pela Springer e indexado pela Web of Science, abrange temas relacionados à interação entre os recursos naturais e as atividades humanas, incluindo ciências do solo, hidrologia e gestão de recursos hídricos, poluição do ar e da água; e Science of the Total Environment (Sci. Total Environ., 1972), publicado pela Elsevier e indexado pela Scopus e pela Web of Science, considerado como multidisciplinar em ciências ambientais, incluindo temáticas na relação e influência da interferência humana no meio ambiente.

Dos 140 artigos verificados, 26 têm média normalizada de citações por ano (CN) superior a 10 citações (Figura 3 e Tabela 1). Desses, 17 são dos últimos cinco anos. O artigo mais antigo com CN superior a 10 citações é de 2009, e o mais recente, de 2022. A proporcionalidade de CN entre esses dois artigos é próxima, de 12,5 e 12,0, respectivamente. Além disso, 27 artigos têm CN inferior a 1,0, sendo que 15 não têm nenhuma citação e são publicações de 2020 a 2022.

O artigo mais citado e com maior CN foi publicado em 2016 e é intitulado "Land-use change affects water recycling in Brazil's last agricultural frontier". O estudo utilizou o produto MOD16 do sensor MODIS para estimar a evapotranspiração na região de MATOPIBA. A grande área de estudo também se repete nos artigos seguintes, em que o segundo artigo mais citado aborda o bioma amazônico e o terceiro, oito estados brasileiros.

Tabela 1. Artigos que apresentam número médio normalizado de citações por ano acima de 10, publicados nas bases indexadoras Scopus, Web of Science e Scielo, sobre evapotranspiração por sensoriamento remoto no Brasil.

ID Nº	CN*	DOI	Revistas	Autores	Ano	Citações
1	38.0	10.1111/gcb.13298	GLOB. CHANG. BIOL.	SPERA S., et al.	2016	228

2	34.5	10.1088/1748-9326/ab738e	ENVIRON. RES. LETT.	STAAL A., et al.	2020	69
3	32.7	10.1016/j.rse.2015.11.034	REMOTE SENS. ENVIRON.	ANDERSON M., et al.	2016	196
4	32.0	10.1016/j.isprsjprs.2021.05.018	ISPRS J. PHOTOGRAMM. REMOTE SENS.	LAIPELT L., et al.	2021	32
5	28.5	10.1016/j.rse.2018.04.048	REMOTE SENS. ENVIRON.	MARIANO D., et al.	2018	114
6	21.0	10.1016/j.rse.2021.112585	REMOTE SENS. ENVIRON.	ZHOU D., et al.	2021	21
7	18.0	10.1186/s13717-019-0158-8	ECOL. PROCESSES.	PACA V., et al.	2019	54
8	17.8	10.5194/hess-22-4815-2018	HYDROL. EARTH SYST. SC.	SIQUEIRA V., et al.	2018	71
9	17.7	10.1175/JHM-D-15-0096.1	J. HYDROMETEOROL.	GETIRANA A.	2016	106
10	17.1	10.1038/nclimate1067	NAT. CLIM. CHANGE.	LOARIE S., et al.	2011	188
11	16.0	10.5194/hess-25-2279-2021	HYDROL. EARTH SYST. SC.	BAKER J., et al.	2021	16
12	15.8	10.1002/2013WR015202	WATER RESOUR. RES.	OLIVEIRA P., et al.	2014	126
13	15.0	10.1016/j.oneear.2021.06.002	ONE EARTH	SAATCHI S., et al.	2021	15
14	14.5	10.1016/j.jag.2019.101982	INT. J. APPL. EARTH OBS. GEOINFORM.	DOS SANTOS C., et al.	2020	29
15	13.8	10.1002/2017GL072955	GEOPHYS. RES. LETT.	ZEMP D., et al.	2017	69
16	13.7	10.1016/j.jhydrol.2019.05.021	J. HYDROL.	MOREIRA A., et al.	2019	41
17	13.0	10.3390/rs13040773	REMOTE SENS.	JAAFAR H., et al.	2021	13
18	12.5	10.1016/j.agrformet.2008.09.016	AGRIC. FOR. METEOROL.	TEIXEIRA A., et al.	2009	162
19	12.1	10.1080/02626667.2013.837578	HYDROL. SCI. J.	RUHOFF A., et al.	2013	109
20	12.0	10.1016/j.jhydrol.2021.126184	J. HYDROL.	OLIVEIRA A., et al.	2021	12
21	12.0	10.3390/rs14081911	REMOTE SENS.	JARDIM A., et al.	2022	12
22	11.3	10.1016/j.scitotenv.2018.09.242	SCI. TOTAL ENVIRON.	MOURA M., et al.	2019	34
23	10.7	10.3389/ffgc.2019.00047	FRONT. FOR GLOB. CHANG.	BAKER J., et al.	2019	32
24	10.6	10.1371/journal.pone.0179414	PLOS ONE	NÓBREGA R., et al.	2017	53
25	10.5	10.3390/rs12071221	REMOTE SENS.	JAVADIAN M., et al.	2020	21
26	10.3	10.1016/j.envsci.2019.04.006	ENVIRON. SCI. POLICY	SILVA JUNIOR C., et al.	2019	31

*Para o cálculo do CN não foi considerado o ano de publicação do artigo.

Dos 26 artigos com CN > 10, 19 apresentam escala espacial global ou regional, enquanto apenas sete (ID14, ID17, ID18, ID19, ID20, ID21 e ID24) apresentam escala local (municipal, bacia hidrográfica ou experimental) (Tabela 1). Artigos com maior escala espacial têm mais chances de serem citados, pois seus resultados podem ser reproduzidos ou comparados com outros estudos. Além disso, seus resultados podem ser aplicados a áreas menores. Artigos de menor escala espacial são mais citados por instituições localizadas próximas à área de estudo. Por exemplo, o artigo ID14, que estuda a Estação Ecológica de Seridó, no Rio Grande do Norte, é mais citado por instituições do Nordeste. Também é importante notar que artigos com autocitação são mais citados. Por exemplo, os artigos ID19 e ID21 são mais citados pelo primeiro autor.

O número de citações dos 26 artigos da Tabela 1 variou ao longo do tempo, seguindo um padrão em forma de parábola. No primeiro ano de publicação, os artigos receberam poucas ou nenhuma citação, como é o caso dos ID6, ID8, ID12, ID15, ID17, ID19 e ID23. Em seguida, o número de citações aumentou gradualmente até atingir um pico. Após o pico, o número de

citações passou a diminuir até que o artigo se tornasse obsoleto (Tabela 2) (Mingers; Leydesdorff, 2015).

Tabela 2. Número de citações por ano após a publicação, para os artigos que apresentam número médio normalizado de citações (CN) por ano acima de 10,0, publicados nas bases indexadoras Scopus, Web of Science e Scielo, com o tema evapotranspiração por sensoriamento remoto no Brasil (O ID do artigo pode ser verificado na Tabela 1).

Ano de publicação	Artigo	Citações/Ano														
		2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	
2016	ID 1								5	19	31	33	60	42	38	
2020	ID 2												10	28	31	
2016	ID 3								3	22	16	27	38	44	46	
2021	ID 4													3	29	
2018	ID 5										3	18	27	31	35	
2021	ID 6													0	21	
2019	ID 7											3	8	20	23	
2018	ID 8										0	9	20	15	27	
2016	ID 9								10	7	18	19	17	12	23	
2011	ID 10			6	14	17	18	30	21	20	19	11	5	12	15	
2021	ID 11													4	12	
2014	ID 12						0	6	10	15	14	16	15	24	26	
2021	ID 13													3	12	
2020	ID 14												9	11	9	
2017	ID 15									0	11	10	9	16	23	
2019	ID 16											3	1	21	16	
2021	ID 17													0	13	
2009	ID 18	5	4	8	22	14	14	14	12	12	7	15	14	8	13	
2013	ID 19					0	2	8	11	9	17	16	9	18	19	
2021	ID 20													3	9	
2022	ID 21														12	
2019	ID 22											2	8	8	16	
2019	ID 23											0	6	11	15	
2017	ID 24									1	6	8	14	11	13	
2020	ID 25												6	5	10	
2019	ID 26												5	8	18	



Baker J. é o único autor com dois artigos com CN > 10 (IDs 11 e 23), mas não figura entre os autores e coautores com cinco ou mais artigos publicados (Tabela 1 e Figura 4a). Dos autores ou coautores com pelo menos cinco artigos publicados, apenas três autores (Laipeld L., Teixeira A. e Ruhoff A.) têm CN > 10. Ruhoff A., além de ser autor principal de um dos artigos com CN > 10, é coautor de outros três (ID 4, 8 e 16 - Tabela 1).

A análise dos 140 artigos selecionados identificou 633 autores e coautores, dos quais 485 são autores ou coautores de apenas um artigo e 20, de pelo menos cinco artigos (Figura 4a).

Apenas dois artigos são de autoria individual, sendo que um deles apresenta índice de citação (CN) superior a 10 (Getirana A. - Tabela 1). Entre os autores e coautores com pelo menos cinco artigos, destaca-se que Aragão L., Hernandez F., Da Cunha F., Moraes E., Mantovani E., Roberti D., Leivas J., Neale C. e Coe M. não são autores principais em nenhum artigo, apenas coautores (Figura 4a). Aragão L., apesar de ter apenas cinco artigos publicados e não ser primeiro autor em nenhum deles, é o autor com o maior índice H (61) (Figura 4a). Esse elevado índice H, mas pouca quantidade de trabalhos dentro do escopo avaliado, possivelmente se deve ao fato de Aragão L. ser pesquisador do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e trabalhar com sensoriamento remoto. No entanto, seu foco de pesquisa é direcionado ao ciclo do carbono e às mudanças de uso do solo, e não especificamente à evapotranspiração.

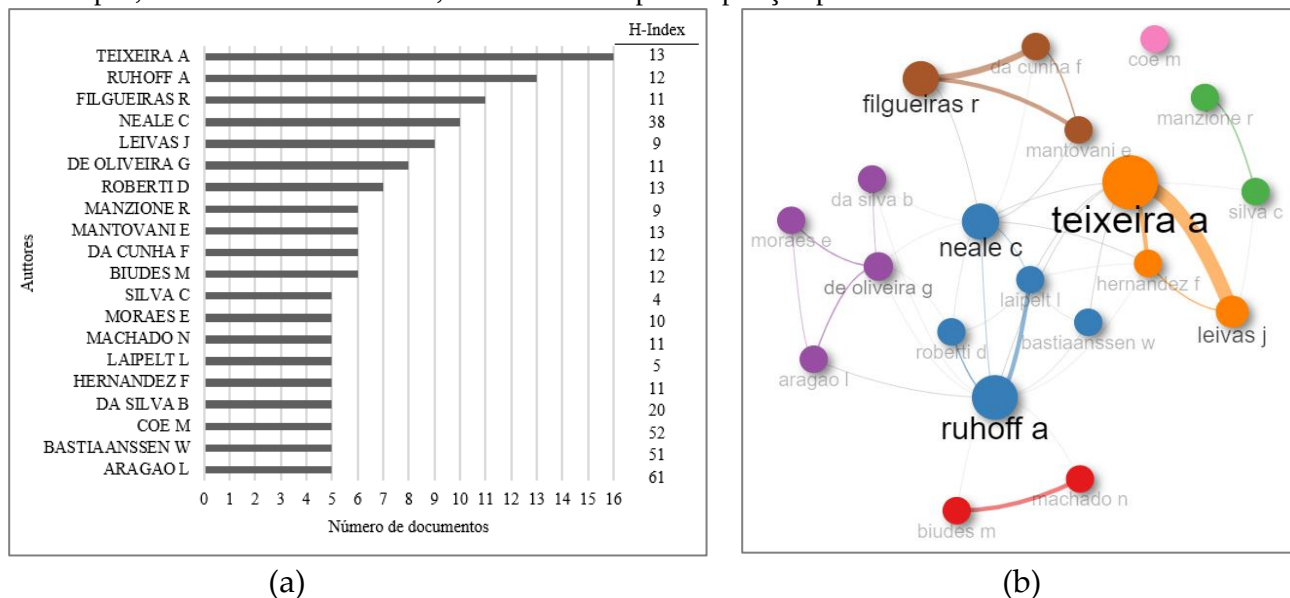
Coe M. também apresenta um alto índice H (52) e é coautor de apenas cinco artigos (Figura 4a). Além de ser coautor do artigo com o maior CN (ID 1 - Tabela 1), é pesquisador do Woodwell Climate Research Center, uma organização de pesquisa que estuda mudanças climáticas globais, mas não tem foco no Brasil, um dos filtros utilizados neste estudo. Isso explica o alto índice H do referido autor, mas pouca autoria de artigos dentro do escopo avaliado nesse estudo. Bastiaanssen W., apesar de estar em apenas cinco artigos, dos quais três apresentam CN > 10 (ID 4, 7 e 18 - Tabela 1), apresenta o segundo maior índice H (Figura 4a). Isso está associado ao fato de ele ser o autor da metodologia SEBAL utilizada na estimativa da evapotranspiração por sensoriamento remoto. Porém, o foco inicial da análise não foi o Brasil (Bastiaanssen et al., 1998).

Outro destaque importante é o autor Teixeira A., que aparece em 16 artigos (Figura 4a). Dois desses artigos têm CN > 10: um deles, publicado em 2009, tem Teixeira A. como primeiro autor, e o outro, publicado em 2022, tem CN = 12 (IDs 18 e 21, respectivamente - Tabela 1). Dos 16 artigos de que esse autor participa, ele é o primeiro autor em 10 (sendo autor único em apenas um). Ele também apresenta uma densa rede de colaboradores (Figura 4b). Esse autor é pesquisador da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, unidade semiárida, o que explica que 8 de seus artigos apresentem como área de estudo a região Nordeste brasileira.

O autor Ruhoff A. é o segundo autor com o maior número de artigos, com 13 publicações entre os 140 avaliados (Figura 4a). Ele é o primeiro autor de três desses artigos. Ruhoff A. tem colaborações com 11 dos autores que publicaram cinco ou mais artigos e está ligado a três grupos de autores (Figura 4b). Os autores do grupo de que Ruhoff A. faz parte têm a regionalidade como elemento comum. O grupo é composto por cinco autores, dos quais três são afiliados a universidades do Rio Grande do Sul: Ruhoff A. e Laipelt L. são da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), e Roberti D. é da Universidade Federal de Santa Maria

(UFSM). Os dois autores que não têm a regionalidade como similaridade são Bastiaanssen W., do Delft Institute for Water Education, na Holanda, e Neale C., da University of Nebraska, nos Estados Unidos.

Figura 4. Número de artigos por autores e coautores com pelo menos cinco artigos e seus respectivos índices H (a) e suas redes de colaboração (b), vinculados a artigos publicados nas bases indexadoras Scopus, Web of Science e Scielo, com o tema evapotranspiração por sensoriamento remoto.



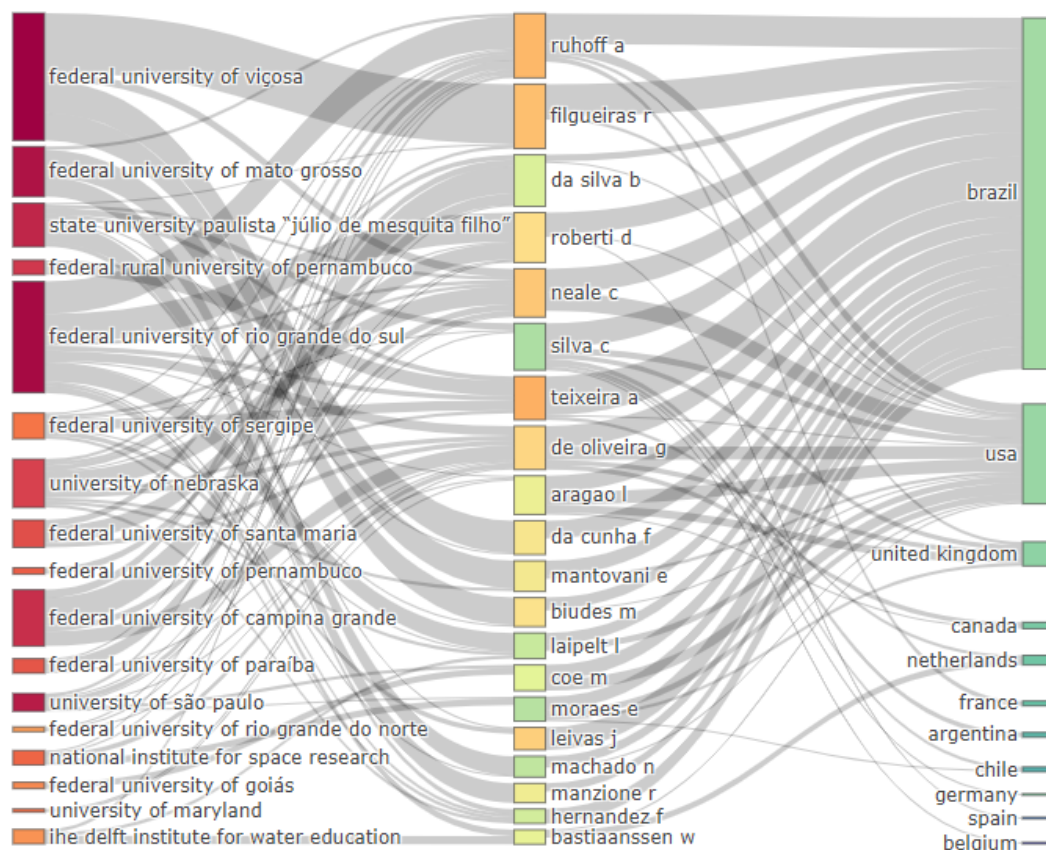
A similaridade regional também ocorre nos clusters de Manzione R., que são afiliados às universidades localizadas no estado de São Paulo (UNESP e UNICAMP), e de Biudes M. e Machado N., que são afiliados às instituições localizadas no estado de Mato Grosso (UFMT e IFMT) (Figura 4b). No cluster de Filgueiras R., Da Cunha F. e Mantovani E., além da similaridade regional, todos os autores pertencem à mesma instituição (UFV) (Figura 4b).

Cerca de 23,6% dos autores ou coautores dos 140 artigos avaliados não são brasileiros. A colaboração entre pesquisadores de instituições e países distintos é uma prática comum na ciência, pois contribui para o desenvolvimento de pesquisas. As redes de conexões entre autores e coautores podem ser visualizadas no diagrama de Sankey, no qual os retângulos representam as categorias de autores, o tamanho é proporcional à frequência de ocorrência, e as linhas representam a magnitude do fluxo de dados (Figura 5).

Os autores Ruhoff A. e Filgueiras R. apresentam as maiores frequências, com fluxos principalmente para instituições brasileiras, especialmente para suas instituições de origem (UFRGS e UFV). Ambos também apresentam fluxos de colaboração entre o Brasil e os EUA. Porém, Ruhoff A. também tem ligações com publicações de outros pesquisadores franceses e britânicos (Figura 5). Pelo contexto dos termos de pesquisa, espera-se que o Brasil seja o país de maior frequência, com fluxos para 19 dos 20 principais autores. Os Estados Unidos vêm em

segundo lugar, com fluxos para 16 dos 20 principais autores. Das 20 principais instituições associadas às 140 publicações avaliadas, 17 são brasileiras, duas estão localizadas nos EUA (Universidade de Nebraska e Universidade de Maryland) e uma é holandesa (IHE Delft Institute for Water Education).

Figura 5. Diagrama de Sankey para as 20 principais instituições (à esquerda), 20 principais autores (no centro) e 20 principais países (à direita), vinculados a artigos publicados nas bases indexadoras Scopus, Web of Science e Scielo, sobre evapotranspiração por sensoriamento remoto no Brasil.



As instituições UFV e UFRGS têm as maiores frequências de associação nos artigos avaliados, com fluxos principalmente para autores brasileiros, especialmente para autores afiliados às próprias instituições. Ao todo, foram listadas 245 instituições de lotação dos autores e coautores dos 140 artigos avaliados. Das 15 principais instituições, 11 são universidades brasileiras federais ou estaduais, duas são Norte-Americanas (Universidade de Nebraska e Universidade de Maryland) e uma é voltada para a pesquisa (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE) (Figura 6a).

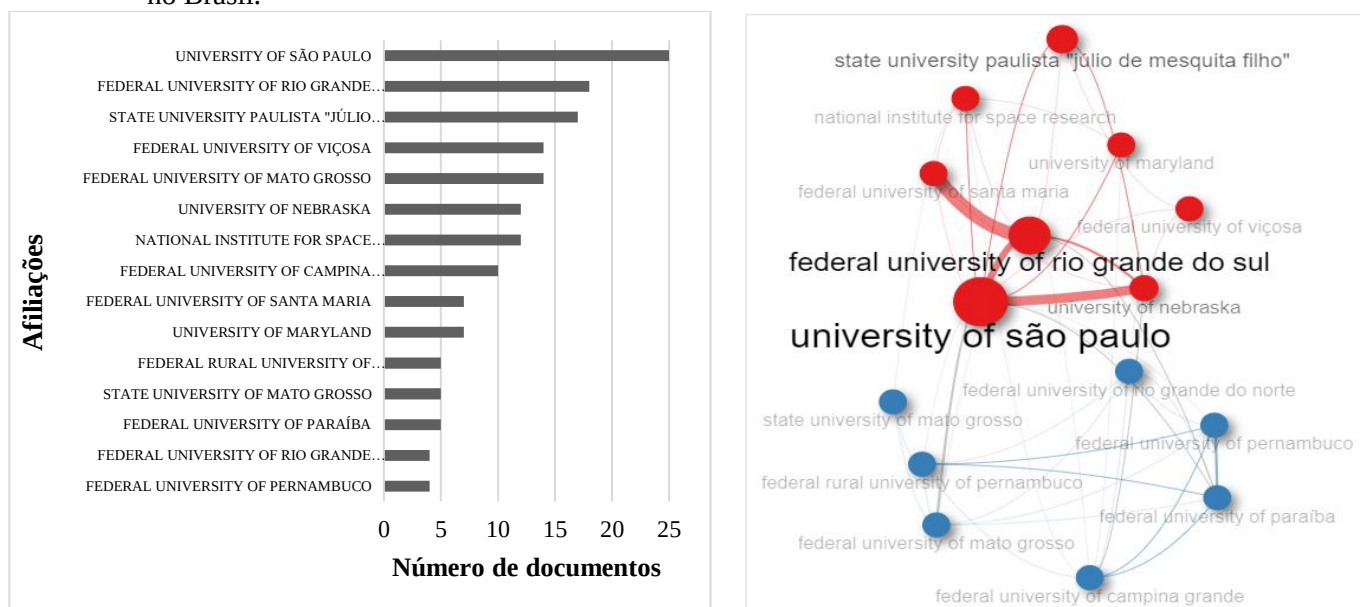
A análise das 15 principais instituições revela que se dividem em dois grandes clusters. O primeiro cluster é composto por instituições das regiões Sul e Sudeste, e o segundo, por instituições das regiões Centro-Oeste e Nordeste (Figura 6b). As instituições localizadas na região Sudeste são responsáveis por 47,2% dos artigos avaliados. A maioria dessas instituições

é do estado de São Paulo (USP, UNESP e INPE). A única instituição fora de São Paulo é a UFV, de Minas Gerais. As instituições localizadas na região Sul são responsáveis por 17,4% dos artigos avaliados. As duas principais instituições da região são a UFRGS e a UFSM. As instituições localizadas na região Centro-Oeste são responsáveis por 13,2% dos artigos avaliados. As duas principais instituições da região são a UFMT e a UNEMAT. As instituições localizadas na região Nordeste são responsáveis por 19,4% dos artigos avaliados. As cinco principais instituições da região são a UFCG, a UFRPE, a UFPE, a UFPB e a UFRN. As instituições norte-americanas são responsáveis por 13,2% dos artigos avaliados. As duas principais instituições norte-americanas são a Universidade de Nebraska e a Universidade de Maryland.

A UFRGS e a UFSM apresentam o maior número de artigos em coautoria, com 7. A USP e a Universidade de Nebraska também apresentam um número significativo de artigos em coautoria, totalizando 6. A ligação entre os dois clusters ocorre por meio da coautoria entre a USP e a UFMT, que publicaram três artigos em conjunto (Figura 6b).

A UNESP, assim como a USP e a UFRGS, figura no ranking das instituições com o maior número de artigos avaliados (Figura 6a). No entanto, a UNESP se diferencia por apresentar pouca colaboração com outras instituições. Foram encontradas coautorias com a USP e a Universidade de Nebraska em apenas dois artigos, e com a UFV e a UFRGS, em apenas um artigo (Figura 6b).

Figura 6. Número de artigos (a) e de redes de colaboração institucional (b) das 15 principais filiações (com ao menos um artigo de colaboração entre si) de autores e coautores com artigos publicados nas bases indexadoras Scopus, Web of Science e Scielo, sobre evapotranspiração por sensoriamento remoto no Brasil.



(a)

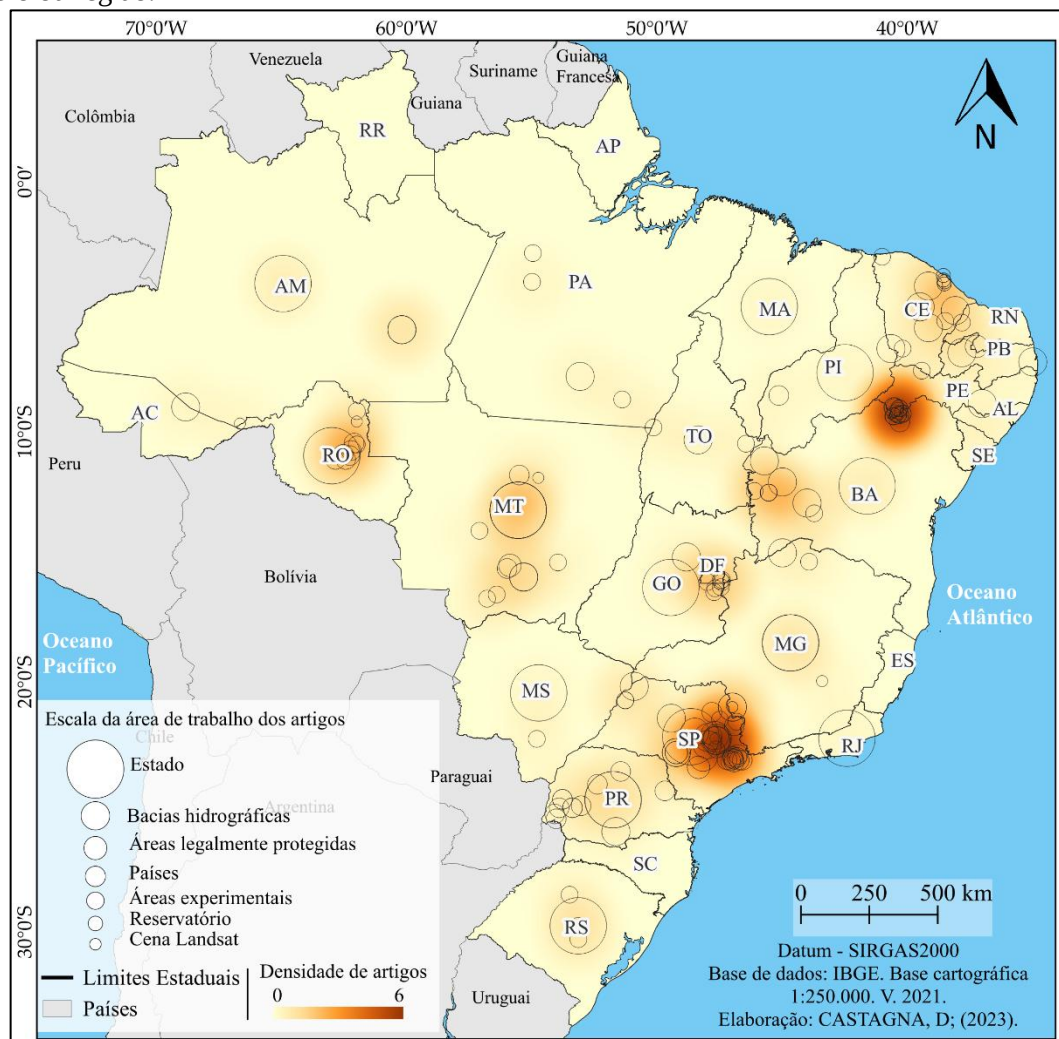
(b)

2.4. Discussão

2.4.1. Produção científica sobre evapotranspiração por sensoriamento remoto no Brasil por regiões e biomas brasileiros

Além da alta relevância das instituições com maior número de artigos publicados sobre o tema avaliado, as pesquisas desenvolvidas no limite territorial do Estado de São Paulo concentram o maior número de artigos (21). Em contrapartida, os estados de Alagoas, Espírito Santo, Santa Catarina, Roraima e Amapá não foram considerados áreas de estudo em nenhum dos 140 artigos avaliados (Figura 7). Quando se analisa por regiões brasileiras, o Nordeste apresenta a maior quantidade de trabalhos (36 artigos), com destaque para os municípios de Juazeiro (BA) e Petrolina (PE), nos quais foram desenvolvidas 10 pesquisas dentre os avaliados (Figura 7).

Figura 7. Distribuição dos artigos que utilizam o sensoriamento remoto para estimar a evapotranspiração no Brasil. Exclusão de grandes escalas espaciais: mundial, florestas tropicais, América do Sul, país, aquífero ou região.



As escalas espaciais de aplicação de metodologias de estimativa da evapotranspiração por sensoriamento remoto no Brasil variam de análises em âmbito mundial a avaliações locais (pontuais), como em áreas experimentais e/ou em cenas específicas do satélite Landsat.

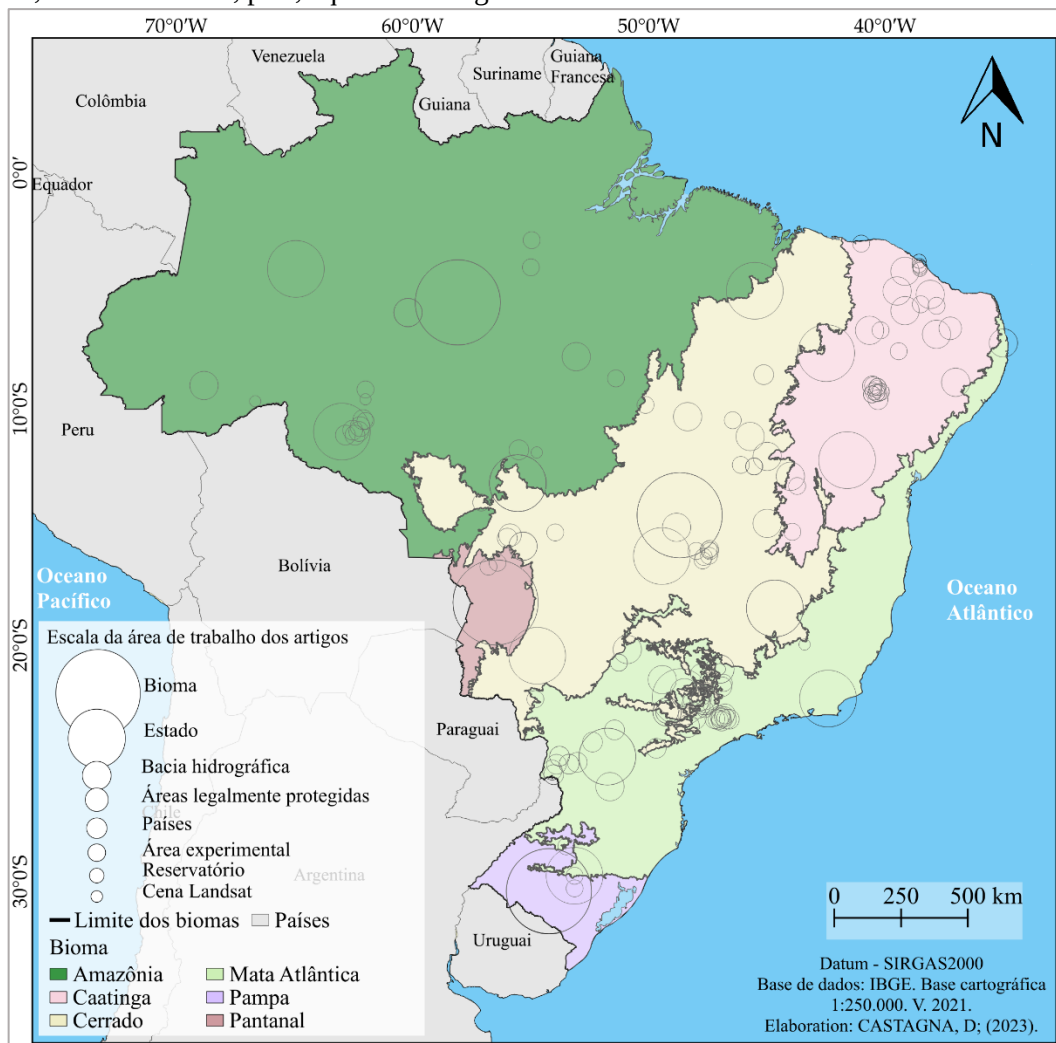
Os artigos de escala espacial global são de Javadian et al. (2020) e de Zhou et al. (2021), e ambos apresentam relação $CN < 10$ (Tabela 1). Esses dois artigos não apresentam nenhum autor brasileiro ou com filiação brasileira, sendo seus autores de origem chinesa, estadunidense, canadense e australiana. Para florestas tropicais, foi avaliado apenas um artigo sobre o tema. Esse artigo, de Saatchi et al. (2021), tem $CN = 15$, com 58 autores de 50 filiações distintas. Apenas um é brasileiro, Carlos Nobre (Tabela 1).

Ainda considerando os artigos que avaliaram ET por sensoriamento remoto em grandes escalas, foram avaliados sete artigos para a América do Sul (Anderson et al., 2015; Pereira et al., 2017; Zemp et al., 2017; Siqueira et al., 2018; Moreira et al., 2019; Melo et al., 2021; Ruhoff et al., 2022), quatro artigos a nível de Brasil (Getirana 2016; Bazame et al., 2019; Dias et al., 2021; Laipelt et al., 2021) e sete artigos à nível de região (sendo, três para região nordeste (Mariano et al., 2018; Cunha et al., 2020; De Oliveira et al., 2022); um para região sudeste e nordeste, (Rebello et al., 2020); um para a mesoregião de Bauro –SP (Rampazo et al., 2021); um para locais região de transição Cerrado/Amazônia (De Oliveira et al., 2018); e, um para para a região de transição Cerrado/Amazônia (Da Silva Júnior et al., 2019)). Além disso, foi avaliado um artigo no nível do Aquífero Urucuia (De Andrade et al., 2021).

Quanto aos estudos que avaliaram os biomas brasileiros (em toda a extensão territorial, independentemente do estado), foram encontrados 13 artigos. Destes, quatro artigos abordaram o bioma Cerrado (Loarie et al., 2011; Oliveira et al., 2014; Arantes et al., 2016; Rodrigues et al., 2022), quatro artigos o bioma Pampa (Da Rocha et al., 2020; Käfer et al., 2020; Käfer et al., 2022; Kayser et al., 2022), três artigos no bioma Amazônia (Vergopolan e Fisher, 2016; Baker et al., 2019; Staal et al., 2020), dois artigos no Pantanal (Penatti et al., 2015; Teixeira et al., 2015), e um artigo que analisou a ET para vários estados (Maranhão; Piauí; Bahia, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul; Goiás; Paraná; Rio Grande do Sul) (Anderson et al., 2016).

Para escalas menores, há mais artigos. No limite do bioma Cerrado foram publicados 40 artigos entre 2011 e 2022. Desses, oito artigos são de escala estadual (três para Minas Gerais e cinco para Mato Grosso), dois para a escala municipal, 11 para a escala de bacias hidrográficas, quatro para áreas legalmente protegidas (dois artigos para a Estação Ecológica de Santa Bárbara, a Estação Ecológica de Angatuba e o Parque Nacional Chapada dos Guimarães) e 15 artigos para a escala de áreas experimentais (Figura 8).

Figura 8. Distribuição dos artigos que utilizam o sensoriamento remoto para estimar a evapotranspiração no Brasil, por bioma. Exclusão de artigos desenvolvidos em grandes escalas espaciais: mundial, florestas tropicais, América do Sul, país, aquífero ou região.



Os estudos desenvolvidos no bioma Mata Atlântica totalizaram 25 artigos publicados entre 2011 e 2022. Desses, três são artigos de escala estadual (Rio de Janeiro, São Paulo e Paraná), cinco de escala municipal, oito de bacias hidrográficas, cinco de áreas experimentais e quatro de cenários de Landsat (Figura 8). Além disso, identificou-se um artigo que aborda as transições entre os biomas Mata Atlântica e Cerrado na mesorregião de Bauru, no estado de São Paulo.

No bioma Caatinga, foram identificados 24 artigos, sendo dois em escala municipal, um em áreas protegidas (Estação Ecológica do Seridó, em Serra Negra do Norte), cinco em bacias hidrográficas, 14 em áreas experimentais e dois em reservatórios hidroelétricos. Os artigos avaliados para esse bioma foram publicados entre 2001 e 2022, com destaque para o artigo mais antigo dentre os 140 avaliados (de 2001), de Bastiaanssen et al. (2001), que estudou uma pequena área experimental no estado de Pernambuco (Figura 8).

No bioma Amazônia, foram encontrados 15 artigos, sendo dois de escala estadual (Amazonas e Rondônia), dois de escala municipal, cinco para bacias hidrográficas, cinco em áreas experimentais e um de escala de cena de Landsat. Os artigos publicados na área da Amazônia são mais recentes, com o mais antigo publicado em 2016 e o mais recente em 2022 (Figura 8). Nos biomas Pantanal e Pampa, foram encontrados apenas dois artigos por bioma, ambos de escala de áreas experimentais (Figura 8). Os artigos publicados no bioma Pantanal foram publicados em 2015 e 2021 e, no bioma Pampa, em 2014 e 2022.

2.4.2. *Produção científica sobre evapotranspiração por sensoriamento remoto no Brasil nas instituições científicas e na Pós-Graduação Stricto Sensu*

As filiações dos autores, conforme a localização da área de estudo do artigo por bioma, indicam que a maioria das instituições está no bioma ou em sua proximidade. O bioma Caatinga tem 11 filiações com dois ou mais artigos, sendo que 10 dessas filiações são de instituições localizadas na região Nordeste, única região do Brasil que apresenta o bioma Caatinga (Quadro 1).

A predominância de instituições localizadas nos biomas também pode ser observada nos biomas Cerrado, Mata Atlântica, Pampa e Pantanal. No entanto, no bioma Amazônia, isso não ocorre, pois apenas duas das 11 instituições que aparecem em dois ou mais artigos estão localizadas nesse bioma. Essas instituições são: uma da região Nordeste, o INPE; uma da região Sudeste, a UFRRJ; e seis internacionais (Quadro 1).

Quadro 1. Afiliações presentes em até dois artigos, categorizadas conforme o bioma onde se localiza a área de estudo do respectivo artigo.

BIOMA	AFILIAÇÕES	BIOMA	AFILIAÇÕES
Mata Atlântica	Universidade de São Paulo	Cerrado	Universidade de São Paulo
	Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"		Universidade Federal de Viçosa
	Universidade do Nebraska		Universidade Federal do Mato Grosso
	Universidade Federal do Rio Grande do Sul		Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"
	Universidade Tecnológica Federal do Paraná		Universidade do Nebraska
	Universidade Federal de Sergipe		Universidade Federal de Goiás
	Universidade da Flórida		Instituto Federal de Mato Grosso
	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais		Universidade Federal Rural do Amazonas
	Universidade Federal da Paraíba		Embrapa Cerrados
	Universidade de Campinas		Instituto de Pesquisa Tecnológica
	Universidade Federal de Campina Grande		Universidade Federal de Lavras
	Universidade Federal de Pernambuco		Universidade de Brasília
Caatinga	Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"		National Institute for Space Research

	Universidade Federal do Ceará		Universidade de Maryland
	Universidade Federal de Campina Grande		Universidade Federal do Amazonas
	Embrapa Tabuleiros Costeiros		Universidade Estadual de Campinas
	Universidade Federal Rural de Pernambuco		Universidade da California Irvine
	Universidade Federal de Viçosa	Amazônia	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
	Universidade Federal de Sergipe		Universidade Exeter
	Universidade Federal Rural do Semi-Árido		Universidade Federal de Mato Grosso
	Instituto Federal do Ceará		Universidade Estadual de Dakota do Sul
	Universidade Federal do Rio Grande do Norte		Universidade de Leeds
	Universidade Federal Alagoas		Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Instituto Nacional do Semi-Árido	Universidade Federal de Campina Grande		
Pampa	Universidade Federal de Santa Maria		Universidade Federal de Rondônia
	Universidade Federal do Rio Grande do Sul		Universidade Estadual de Oklahoma
Pantanal	Universidade Federal de Mato Grosso		Universidade do Kansas

O número de instituições estrangeiras com artigos que têm o bioma Amazônia ou áreas dentro do seu limite como área de estudo pode ser considerado um reflexo do interesse internacional pela região (Budowski, 1975; Malhado et al., 2014). Além disso, a falta de soberania de instituições locais pode estar ligada ao pequeno número de programas de pós-graduação (PPGs) nas áreas de conhecimento multidisciplinares (ciências ambientais), geociências e ciências exatas e da terra que desenvolvem artigos sobre evapotranspiração por sensoriamento remoto. Porém, somente os PPGs da área de Ciências Ambientais serão considerados para análise da temática no Bioma Amazônia.

Nas condições brasileiras de produção de conhecimento científico, grande parte da produção de artigos científicos internacionais está associada aos PPGs em função dos projetos de dissertações (mestrado) ou teses (doutorado). No entanto, na região Amazônica brasileira, são oferecidos apenas 18 PPGs na área de Ciências Ambientais (que, em sua maioria, oferecem apenas o nível de mestrado), distribuídos em 11 instituições e em 7 estados. Por outro lado, apenas o estado de São Paulo possui 20 PPGs na mesma área (Plataforma Sucupira, [s.d.]).

Todavia, não é apenas o número de programas que influencia a quantidade de artigos científicos internacionais publicados, mas também os recursos recebidos pelos PPGs para a produção científica. Atualmente, no Brasil, a distribuição de recursos financeiros aos PPGs depende de uma avaliação quadrienal, que atribui um conceito variando de 3 a 7, em níveis crescentes de qualidade dos PPGs em três dimensões (programa e formação de recursos humanos; produção científica e técnica; inserção social). Quanto maior o conceito, maiores a qualidade do PPG e a quantidade de recursos financeiros disponibilizados pelas agências públicas de fomento à pesquisa e à pós-graduação.

Os PPGs em Ciências Ambientais localizados no bioma Amazônia podem ser considerados programas novos, pois apresentam, em média, 11 anos de implantação (o mais antigo foi criado em 2000 e o mais recente, em 2019). Dois dos programas recém-criados (2018 e 2019) ainda não passaram pela avaliação quadrienal (o último ciclo de avaliação foi de 2017 a 2020) e possuem apenas autorização para funcionamento. Dos outros 16 PPGs da Amazônia, apenas um possui conceito “5” e os demais apresentam, majoritariamente, conceitos 3 ou 4 (Plataforma Sucupira, [s.d.]).

Associado à avaliação quadrienal, no Brasil, existe um sistema de classificação de periódicos denominado Qualis (Qualis-Periódicos ou Qualis/CAPES), mantido pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). O sistema busca relacionar e classificar os periódicos utilizados para a divulgação da produção intelectual de pós-graduação do tipo “*stricto sensu*”, quanto ao âmbito de circulação (local, nacional ou internacional) e à qualidade (em 9 níveis) por área de avaliação/conhecimento. O Qualis busca reduzir a subjetividade na avaliação da qualidade dos periódicos científicos ao considerar indexações em bases nacionais e internacionais, bem como indicadores bibliométricos internacionais, como o JCR e o CiteScore. Em geral, periódicos científicos com circulação internacional apresentam-se melhor classificados no Qualis em função de maiores valores de JCR e CiteScore, excetuando-se as revistas ou editoras consideradas “predatórias”.

O ciclo vicioso entre a baixa produção de artigos de alto impacto e a qualidade dos PPGs decorre da dificuldade em acessar recursos financeiros das agências de fomento destinados à pesquisa e às bolsas de estudo (mestrado, doutorado e pós-doutorado). Esse ciclo agrava as assimetrias entre programas consolidados e em desenvolvimento nas regiões brasileiras. É necessário destinar recursos que fomentem PPGs menores para atingir a excelência (Côco; Amaral, 2021), em vez de fomentar o fechamento de programas com Qualis 3 e 4 ou de direcionar, total ou parcialmente, recursos destinados a esses PPGs para outros programas com conceitos superiores (6 ou 7) (Mcmanus; Baeta Neves, 2021; Schwartzman, 2022). É importante melhorar a distribuição e fixação regional de pesquisadores pelo Brasil, fomentando novos centros de referência no desenvolvimento de pesquisas de excelência.

2.4.3. *Aplicações da evapotranspiração por sensoriamento remoto no Brasil*

Os biomas brasileiros apresentam particularidades próprias, com necessidades e características específicas. Essas particularidades, juntamente com o olhar do pesquisador e as problemáticas ou demandas regionais por novos conhecimentos, balizam as pesquisas

desenvolvidas em cada bioma. Esse contexto se reflete nos artigos e nas respectivas aplicações temáticas que envolvem a evapotranspiração por meio do sensoriamento remoto. As palavras-chave utilizadas nos artigos sobre evapotranspiração por sensoriamento remoto no Brasil refletem o contexto da temática pesquisada. Os termos mais frequentes são relacionados ao sensoriamento remoto, como MODIS, Landsat e imagens de satélite. Também são comuns termos relacionados às metodologias utilizadas, como algoritmo, calibração e modelos. Por fim, há termos relacionados às regiões de estudo, como Pantanal, Cerrado, Amazônia, região semiárida e América do Sul (Figura 9).

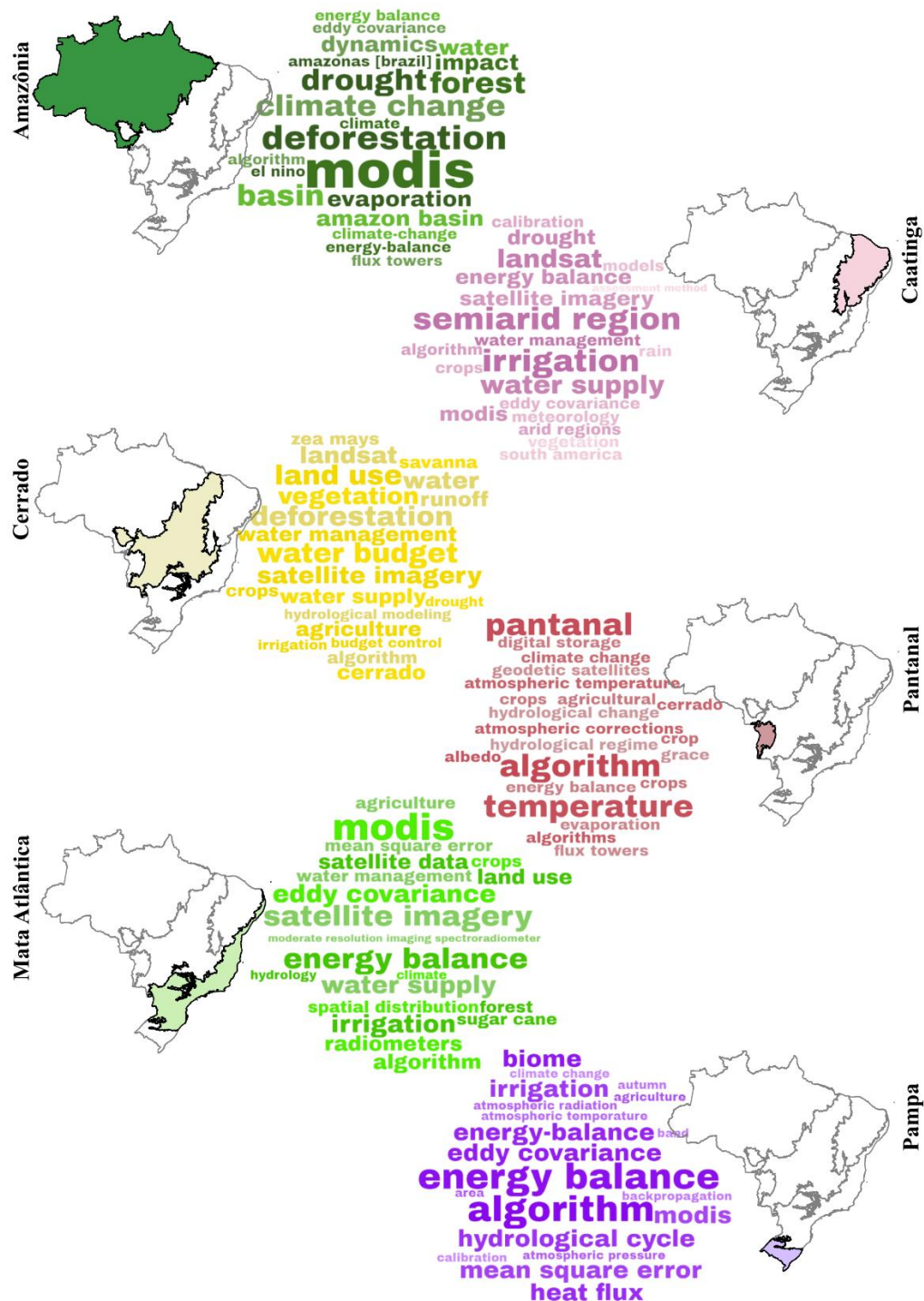
No entanto, é possível observar particularidades nos artigos publicados em cada bioma. Por exemplo, no bioma Amazônia, as 20 principais palavras-chave dos artigos avaliados são bacias hidrográficas, clima, mudanças climáticas, El Niño e desmatamento (Figura 9). O desmatamento na Amazônia e suas implicações locais e globais são objeto de estudo em diversos artigos científicos. No que diz respeito à evapotranspiração, áreas desmatadas, assim como o novo uso e a cobertura do solo implantados após o desmatamento (seja pecuária ou agricultura) apresentam padrões de evapotranspiração diferentes das áreas de cobertura florestal (Khand et al., 2017; Numata et al., 2017; Baker; Spracklen, 2019; Da Silva; Gonçalves; Bezerra, 2019; De Oliveira et al., 2020).

No Cerrado, as palavras-chave dos artigos publicados podem ser divididas em dois grupos principais: recursos hídricos (água, gestão da água, escoamento, gerência da água, abastecimento de água e modelos hidrológicos) e mudanças de uso do solo (desmatamento, vegetação, agricultura, mudança de uso do solo, plantações, uso do solo, mudança de uso do solo e *Zea mays* (milho)) (Figura 9). Essas palavras-chave estão relacionadas às características intrínsecas ao bioma. Além disso, o Cerrado abriga oito importantes bacias hidrográficas brasileiras, bem como as nascentes dos rios São Francisco, Paraíba e Tocantins e é considerado zona de recarga do Aquífero Guarani (Oliveira et al., 2014; Overbeck et al., 2015; De Oliveira et al., 2019). Em relação ao uso do solo, o Cerrado é um bioma intensamente explorado pela agricultura. Cerca de 45,3% da sua área é ocupada por agricultura, pecuária, silvicultura e mosaicos desses usos (MAPBIOMAS, 2023). O primeiro grupo (recursos hídricos) não está completamente desconectado do segundo (uso do solo). As mudanças no uso do solo, como o desmatamento para a implantação da agricultura, impactam os componentes do ciclo hidrológico (Hunke et al., 2015; Rodrigues et al., 2022).

As palavras-chave dos artigos avaliados sobre o bioma Caatinga indicam uma forte relação com características semiáridas, como irrigação, manejo e abastecimento de água (Figura 9). Na Caatinga, a água é um recurso escasso e valioso, e a irrigação é essencial para a produção

agrícola. Por isso, é importante estimar a evapotranspiração com precisão para compreender as necessidades hídricas das plantas. Além disso, a gestão da água é fundamental para evitar desperdícios, especialmente em regiões secas ou em períodos secos do ano (Santos et al., 2020b; Silva et al., 2021).

Figura 9. As 20 principais palavras-chave dos artigos, exceto as de “Evapotranspiration”, “Remote Sensing” e “Brazil”, de acordo com o bioma onde se localiza a área de estudo do artigo.



No bioma Mata Atlântica, as palavras-chave mais destacadas são o balanço de energia e a estimativa da evapotranspiração por meio de sensoriamento remoto. Essas palavras estão associadas a metodologias específicas, como Two Source Energy Balance (TSEB), Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) e Ground-truthed Surface Energy Balance (GT-SEB) (Figura 9). É importante destacar que o termo “cana-de-açúcar” figura entre as 20 principais palavras-chave da Mata Atlântica. Isso ocorre porque os artigos que utilizam esse termo estão localizados no estado de São Paulo, o maior produtor nacional de cana-de-açúcar (Figura 9).

Como poucos artigos foram avaliados para os biomas Pampa e Pantanal, não foi possível identificar tendências ou relações lógicas entre os artigos e as áreas de estudo nesses biomas (Figura 9).

2.4.4. Principais metodologias de sensoriamento remoto para estimativa da evapotranspiração no Brasil

Os 140 artigos avaliados podem ser divididos em três grandes grupos, de acordo com o objetivo na obtenção da evapotranspiração: (i) artigos que utilizam dos dados de evapotranspiração por sensoriamento remoto para alcançar o objetivo do estudo; (ii) artigos que apresentam uma nova proposta de modelo para estimar a evapotranspiração com o uso de dados de sensoriamento remoto; e (iii) artigos que buscam os modelos e produtos que melhor descrevem a evapotranspiração de um determinado local, com validações baseadas em dados *in situ*.

Os artigos que utilizam a evapotranspiração por sensoriamento remoto para atingir um objetivo são diversos. Coelho et al. (2017) utilizaram a evapotranspiração estimada pelo modelo SEBAL para estimar a recarga de água subterrânea em uma bacia hidrográfica do semiárido. Silva et al. (2023) utilizaram a mesma metodologia para avaliar a salinidade do solo no período seco em uma área experimental na Bahia. Outros artigos de grupo buscaram identificar impactos antrópicos no clima e no microclima ou diretamente na evapotranspiração. Loarie et al. (2011) utilizaram o produto MOD16 de evapotranspiração para avaliar os efeitos climáticos da expansão da cana-de-açúcar no Cerrado. Em menor escala espacial, Pinheiro et al. (2022) utilizaram o modelo SEBAL para avaliar o efeito da urbanização em um município do Mato Grosso.

Entre os artigos que apresentam novas propostas para estimar a evapotranspiração por meio do sensoriamento remoto, destacam-se Paca et al. (2019) e Teixeira (2010). Paca et al. (2019) combinaram seis modelos e produtos (GLEAM, SEBS, ALEXI, CMRSET, MOD16 e

SSEBop) para elaborar um novo produto (ET-Amazon) que estima a evapotranspiração em toda a bacia Amazônica. O produto é consistente com a complexidade vegetal da bacia. Teixeira (2010) desenvolveu duas propostas (PM1 e PM2) baseadas na equação de Penman-Monteith. As propostas combinam dados de satélite e de campo com o índice de vegetação NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Uma das propostas, chamada SAFER (Simple Algorithm For Evapotranspiration Retrieving), permite estimar o coeficiente de cultura (k_c) para otimizar o uso da água na produção agrícola. A metodologia SAFER foi utilizada em 21 dos 140 artigos avaliados. Desses artigos, 17 estão estritamente associados à agricultura, dos quais 12 foram desenvolvidos em áreas experimentais irrigadas.

É importante ressaltar que o NDVI, presente no modelo SAFER, não é indicado para regiões com vegetação esparça e solo exposto, como as regiões semiáridas (Meneses; Almeida, 2012). No entanto, identificaram-se 12 artigos publicados que utilizaram o SAFER em áreas com essas características. Esses artigos são justificados por terem sido desenvolvidos em áreas irrigadas homogêneas. Os demais artigos que utilizam o modelo SAFER não abordam áreas irrigadas e estão fora da região semiárida brasileira. Nesse contexto, seria interessante para trabalhos futuros avaliar a possibilidade de uso de outros índices de vegetação junto ao modelo SAFER, como o SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) (Huete, 1988) indicado para regiões semiáridas, o NDWI (Normalized Difference Water Index) (Gao, 1996) sensível à água líquida na vegetação, ou o EVI (Enhanced Vegetation Index) (Liu et al., 2020).

Os artigos que buscam os modelos e produtos que melhor descrevem a evapotranspiração de um determinado local validam suas estimativas com dados *in situ* coletados por estações agrometeorológicas ou por torres de fluxo. Como exemplo, Lima et al. (2019) compararam os modelos METRIC e STSEB com dados *in situ* obtidos por lisímetro em área de sorgo no Nordeste. Os resultados mostraram uma subestimativa média de $5,4 \text{ mm d}^{-1}$ em ambos os modelos, em relação aos dados do lisímetro.

Dentre os artigos avaliados, os dados *in situ* mais empregados para comparar modelos e produtos de evapotranspiração são obtidos por meio de torres de fluxo com sistema de Eddy Covariance. No Nordeste, para a Estação Ecológica do Seridó, Dos Santos et al. (2020) compararam o modelo SEBAL e o produto MOD16 com dados de torre de fluxo. Os autores verificaram que o SEBAL apresentou menor desempenho estatístico nas estimativas no período mais seco, quando comparado ao MOD16. Apesar de também apresentarem subestimativas em comparação com os dados *in situ*, os autores indicaram a utilização do produto MOD16 na região semiárida. Por outro lado, na Amazônia, Paca et al. (2022) comparam os dados *in situ* provenientes de torres de fluxo com o modelo SSEBop e com o produto GLEAM. O SSEBop

apresentou subestimativas e GLEAM superestimativas em relação aos dados in situ. No entanto, o SSEBop apresentou maior concordância entre as estimativas e as medições in situ.

Moreira et al. (2019) compararam as estimativas dos produtos GLEAM e MOD16 com dados de 16 torres de fluxo instaladas em diferentes usos e coberturas do solo na América do Sul. Os autores verificaram que, de modo geral, GLEAM apresentou menores incertezas. Baker et al. (2021) também compararam estimativas de evapotranspiração de produtos e modelos MOD16, P-LSH, GLEAM, ERA5, CMIP5 e CMIP6 com dados da torre de fluxo na bacia Amazônica e nas sub-bacias. No entanto, esses autores obtiveram a evapotranspiração como resíduo do balanço hídrico, ou seja, a diferença entre a precipitação, o escoamento superficial e a mudança no armazenamento de água. Os autores discutiram o grau de incerteza na variável de escoamento superficial decorrente da implantação de usinas hidrelétricas. Os produtos MOD16 e P-LSH obtiveram os melhores resultados entre os métodos avaliados, embora todos tenham apresentado subestimativas. Ruhoff et al. (2022) também utilizaram o método do resíduo do balanço hídrico para estimar a evapotranspiração na América do Sul, e Rodell et al. (2011) aplicaram o método para estimar a evapotranspiração em sete bacias hidrográficas de diferentes regiões do mundo, incluindo a bacia do Tocantins-Araguaia no Brasil.

A definição do modelo ou do produto de evapotranspiração estimado por sensoriamento remoto, utilizada em cada artigo, está relacionada à escala espacial da área de estudo. Produtos globais, como LandFlux-EVAL, Climate Data Record, ALEXI (Atmosphere-Land Exchange Inverse) e GLEAM (Global Land Evaporation Amsterdam) possuem resolução espacial maior e, portanto, são utilizados para estudar área de grande extensão, como continentes - América do Sul (Anderson et al., 2016; Zemp et al., 2017; Siqueira et al., 2018), florestas tropicais úmidas (Saatchi et al., 2021), biomas (Baker; Spracklen, 2019), estados (Anderson et al., 2016) e bacias hidrográficas grandes (Ribeiro et al., 2022).

A escala espacial é um fator que influencia a escolha das metodologias de estimativa da evapotranspiração por meio do sensoriamento remoto. O produto de reanálise MOD16 é o mais utilizado em estudos de grande escala espacial, como o estudo global de Javadian et al. (2020). O modelo SEBAL é mais utilizado em estudos com escala espacial menor, como o estudo brasileiro de Laipelt et al. (2021). Esses modelos também aparecem em artigos com escalas espaciais menores, como em áreas experimentais (Spera et al., 2016). No entanto, o produto MOD16 tem resolução espacial de 250 metros, enquanto, no modelo SEBAL, a resolução está ligada à do sensor utilizado.

A utilização de imagens de média resolução espacial, como as dos satélites Landsat, com resolução de 30 metros, em conjunto com o modelo SEBAL, é um desafio para grandes

áreas espaciais, como continentes ou países, devido à capacidade de processamento dos computadores. No entanto, Laipelt et al. (2021) demonstraram a possibilidade de utilizar a ferramenta geeSEBAL, implementada no Google Earth Engine (GEE), para o processamento de grandes volumes de dados com qualidade e agilidade.

No bioma Amazônia, o produto MOD16 é o método mais utilizado em 12 dos 18 artigos avaliados. As áreas de estudo variam de municípios a bacias hidrográficas e ao bioma como um todo. No entanto, 9 desses artigos abrangem áreas superiores a 100.000 km², o que justifica a utilização de um produto de maior resolução espacial. Nas regiões de transição entre os biomas Amazônia e Cerrado, as complexas relações de uso e ocupação do solo e as variações nos padrões de vegetação nativa dificultam a estimativa da evapotranspiração. Nesses casos, são necessários estudos em menor escala espacial e modelos com refinamento mais aprofundado para possibilitar estimativas de evapotranspiração mais precisas, aplicáveis a projetos hidroagrícolas e ambientais.

Como observado, alguns estudos têm como objetivo identificar o produto mais indicado para o caso em estudo, conduzindo comparações entre dados in situ e produtos de satélite, ou mesmo entre diferentes produtos. Trabalhos de cientometria, como o nosso, desempenham um papel crucial ao oferecer insights sobre os métodos e produtos empregados previamente, incluindo suas características e áreas de aplicação. Isso não apenas evita a duplicação de esforços, mas também agiliza o processo científico ao fornecer referências consolidadas e confiáveis.

2.5. Conclusão

A análise cientométrica apontou um aumento no número de artigos que utilizam o sensoriamento remoto para estimar a evapotranspiração. Esse aumento é resultado do desenvolvimento de modelos e produtos com bons resultados quando comparados com dados in situ e do avanço da capacidade de processamento dos computadores.

Também foi observada uma concentração de artigos em São Paulo e uma escassez no bioma da Amazônia. Essas condições se explicam pelo fato de a região Sudeste concentrar os maiores centros de pesquisa do país e de ter o maior número e os mais antigos programas de pós-graduação. A região Norte tem menos programas de pós-graduação, mas mais novos. Esses fatores demonstram a importância de fomentar e apoiar os programas de pesquisa na região Norte.

A escassez de artigos que estimam a evapotranspiração por meio de sensoriamento remoto no bioma Amazônia, região tão importante para o país, evidencia a necessidade de pesquisas voltadas ao bioma, especialmente em escalas menores. O produto de reanálise MOD16 do sensor MODIS, presente nos satélites Terra e Aqua, é o modelo de estimativa de evapotranspiração por sensoriamento mais utilizado no bioma da Amazônia. No entanto, é importante ressaltar que a maioria dos artigos encontrados sobre o bioma Amazônia aborda grandes áreas, o que pode justificar o uso do produto MOD16. Dessa forma, estudos em menores escalas poderão trazer novas perspectivas sobre os usos de produtos e de modelos de evapotranspiração por meio do sensoriamento remoto.

Outra possível razão para o uso do produto MOD16 é o fato de ser um produto bem consolidado, disponibilizado e processado com correção de nuvens. No entanto, esse mesmo fato pode ser um obstáculo para modelos que necessitem de processamento de rasters no bioma Amazônia, pois a região apresenta alta densidade de nuvens, devido à intensidade da evapotranspiração e da precipitação.

Conforme mencionado, a escassez de artigos sobre a temática proposta, especialmente no bioma Amazônia, dificultou a identificação de padrões claros no uso de produtos de evapotranspiração por parte de SR. Como sugestão para futuras pesquisas, recomenda-se a busca por artigos que abordem áreas de estudo com características semelhantes às da região em análise. Isso ampliará o conjunto de informações disponíveis, permitindo uma análise mais abrangente das tendências relacionadas ao tema.

2.6. Referências bibliográficas

ALLEN, Ricahrd G. *et al.* **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements.** FAO - Irrigation and Drainage: Rome, n. 56; p. 300, 2006. Disponível em: <https://www.fao.org/4/x0490e/x0490e00.htm>. Acesso em: 15 jan. 2023.

ALLEN, Ricahrd G. *et al.* **Evapotranspiration Information Reporting: II.** Recommended Documentation. Agricultural Water Management, v. 98, 921-929, 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378377411000035>. Acesso em: 13 mar. 2023.

ANDERSON, Martha C. *et al.* Comparison of satellite-derived LAI and precipitation anomalies over Brazil with a thermal infrared-based Evaporative Stress Index for 2003–2013. **Journal of Hydrology**, v. 526, p. 287-302, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.005>. Acesso em: 02 abr. 2023.

ANDERSON, Martha C. *et al.* The Evaporative Stress Index as an Indicator of Agricultural Drought in Brazil: An Assessment Based on Crop Yield Impacts. **Remote Sensing of**

Environment, v. 174, p. 82–99, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.11.034>. Acesso em: 04 abr. 2023.

ANGELINI, Luca Peres *et al.* Surface Albedo and Temperature Models for Surface Energy Balance Fluxes and Evapotranspiration Using SEBAL and Landsat 8 over Cerrado-Pantanal, Brazil. **Sensors** v. 21, p. 1–24, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s21217196>. Acesso em: 02 abr. 2023.

ARANTES, Arielle Elias; FERREIRA, Laerte Guimarães.; COE, Michael T. The seasonal carbon and water balances of the Cerrado environment of Brazil: Past, present, and future influences of land cover and land use. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 117, p. 66–78, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.02.008>. Acesso em: 10 jun. 2023.

ARIA, Massimo.; CUCCURULLO, Corrado. Bibliometrix: An R-Tool for Comprehensive Science Mapping Analysis. **Journal of Informetrics**, v. 11, p. 959–975, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>. Acesso em: 22 maio 2023.

BAKER, Jessica C. A. *et al.* Evapotranspiration in the Amazon: Spatial Patterns, Seasonality, and Recent Trends in Observations, Reanalysis, and Climate Models. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 25, p. 2279–2300, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/hess-25-2279-2021>. Acesso em: 15 maio 2023.

BAKER, Jessica C. A.; SPRACKLEN, Dominick V. Climate Benefits of Intact Amazon Forests and the Biophysical Consequences of Disturbance. **Frontiers in Forests and Global Change**, v. 2, p. 1–13, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/ffgc.2019.00047>. Acesso em: 05 jun. 2023.

BASTIAANSEN, Wim G.M. *et al.* Low Cost Satellite Data for Monthly Irrigation Performance Monitoring: Benchmarks from Nilo Coelho, Brazil. **Irrigation and Drainage Systems**, v. 15, p. 53–79, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1023/A:1017967021198>. Acesso em: 02 jul. 2023

BASTIAANSEN, Wim G. M. *et al.* A Remote Sensing Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL). 1. Formulation. **Journal of Hydrology**, v. 2012, p. 198–212, 1998. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00253-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00253-4). Acesso em: 16 ago. 2023.

BAZAME, Helizani Couto *et al.* Modeling the Net Primary Productivity: A Study Case in the Brazilian Territory. **Journal of the Indian Society of Remote Sensing**, v. 47, p. 1727–1735, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12524-019-01024-3>. Acesso em: 23 ago. 2023.

BELLVERT, Joaquim *et al.* Feasibility of Using the Two-Source Energy Balance Model (TSEB) with Sentinel-2 and Sentinel-3 Images to Analyze the Spatio-Temporal Variability of Vine Water Status in a Vineyard. **Remote Sensing**, v. 12, p. 1–25, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs12142299>. Acesso em: 10 mar. 2023.

BEZAK, Nejc *et al.* Soil Erosion Modelling: A Bibliometric Analysis. **Environmental Research**, v. 197, p. 1–16, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111087>. Acesso em: 03 jun. 2023.

BHATTARAI, Nishan; WAGLE, Pradeep. Recent Advances in Remote Sensing of Evapotranspiration. **Remote Sensing**, v. 13, p. 1–5, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs13214260>. Acesso em: 10 ago. 2023.

BIUDES, Marcelo Sacardi *et al.* Evapotranspiration Seasonality over Tropical Ecosystems in Mato Grosso, Brazil. **Remote Sensing**, v. 14, p. 1–25, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs14102482>. Acesso em: 26 jul. 2023.

BOSQUILIA, Raoni W. D. *et al.* Evaluation of Evapotranspiration Variations as a Function of Relief and Terrain Exposure through Multivariate Statistical Analysis. **Ecohydrology & Hydrobiology**, v. 19, p. 307–315, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2018.11.001>. Acesso em: 23 maio 2023.

BUDOWSKI, Gerardo. Scientific Imperialism. **Science and Public Policy**, v. 2, p. 354–360, 1975. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/spp/2.8.354>. Acesso em: 21 jun. 2023.

CAIONI, Charles *et al.* Droughts Amplify Differences Between the Energy Balance Components of Amazon Forests and Croplands. **Remote Sensing**, v. 12, p. 1–18, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs12030525>. Acesso em: 15 maio 2023.

CHEN, Jing M.; LIU, Jane. Evolution of Evapotranspiration Models Using Thermal and Shortwave Remote Sensing Data. **Remote Sensing of Environment**, v. 237, p. 1–20, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111594>. Acesso em: 21 ago. 2023.

CÔCO, Daniela; AMARAL, Livio. Políticas públicas para redução de assimetrias e a pós-graduação na Região da Amazônia Legal/Brasil. **Research, Society and Development**, v. 10, p. 1–16, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i14.21598>. Acesso em: 22 jun. 2023.

COELHO, Victor Hugo R. *et al.* Alluvial Groundwater Recharge Estimation in Semi-Arid Environment Using Remotely Sensed Data. **Journal of Hydrology**, v. 548, p. 1–15, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.02.054>. Acesso em: 05 maio 2023.

CUI, Yaoki; SONG, Lisheng; FAN, Wenjie. Generation of Spatio-Temporally Continuous Evapotranspiration and Its Components by Coupling a Two-Source Energy Balance Model and a Deep Neural Network over the Heihe River Basin. **Journal of Hydrology**, v. 597, p. 1–12, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126176>. Acesso em: 16 maio 2023.

CUNHA, John *et al.* A high-throughput shared service to estimate evapotranspiration using Landsat imagery. **Computers & Geosciences**, v. 134, p. 1–11, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2019.104341>. Acesso em: 21 ago. 2023.

DA ROCHA, Nájila Souza *et al.* The Influence of Land Surface Temperature in Evapotranspiration Estimated by the S-SEBI Model. **Atmosphere**, v. 11, p. 1–18, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/atmos11101059>. Acesso em: 12 ago. 2023.

DA SILVA JÚNIOR, Carlos Antônio *et al.* Remote sensing for updating the boundaries between the Brazilian Cerrado-Amazonia biomes. **Environmental Science & Policy**, v. 101, p. 383–392, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2019.04.006>. Acesso em: 03 jul. 2023.

DA SILVA, Helder José Farias; GONÇALVES, Weber Andrade; BEZERRA, Bergson Guedes. Comparative Analyses and Use of Evapotranspiration Obtained through Remote Sensing to Identify Deforested Areas in the Amazon. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 78, p. 163–174, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.01.015>. Acesso em: 15 maio 2023.

DE ANDRADE, Bruno César Comini *et al.* Remote sensing-based actual evapotranspiration assessment in a data-scarce area of Brazil: A case study of the Urucuia Aquifer System. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 98, p. 1-16, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102298>. Acesso em: 10 jun. 2023.

DE OLIVEIRA, Gabriel *et al.* Evapotranspiration and Precipitation over Pasture and Soybean Areas in the Xingu River Basin, an Expanding Amazonian Agricultural Frontier. **Agronomy**, v. 10, p. 1–14, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy10081112>. Acesso em: 25 ago. 2023.

DE OLIVEIRA, Juarez Ventura *et al.* Differences in precipitation and evapotranspiration between forested and deforested areas in the Amazon rainforest using remote sensing data. **Environmental Earth Sciences** volume, v. 77, p. 1-14, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7411-9>. Acesso em: 12 abr. 2023.

DE OLIVEIRA, Michele L. *et al.* Remote sensing-based assessment of land degradation and drought impacts over terrestrial ecosystems in Northeastern Brazil. **Science of The Total Environment**, v. 835, p. 1-13, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155490>. Acesso em: 03 ago. 2023.

DE OLIVEIRA, Vinícius Augusto *et al.* Modeling the Effects of Climate Change on Hydrology and Sediment Load in a Headwater Basin in the Brazilian Cerrado Biome. **Ecological Engineering**, v. 133, p. 20–31, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.04.021>. Acesso em: 12 set. 2023.

DHUNGEL, Sulochan; BARBER, Michael E. Estimating Calibration Variability in Evapotranspiration Derived from a Satellite-Based Energy Balance Model. **Remote Sensing**, v. 10, p. 1–25, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs10111695>. Acesso em: 15 ago. 2023.

DIAS, Santos Henrique Brat *et al.* Reference evapotranspiration of Brazil modeled with machine learning techniques and remote sensing. **Plos One**, v. 16, p. 1-19, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0245834>. Acesso em: 01 jul. 2023.

DOS SANTOS, Carlos Antônio C. *et al.* Spatio-Temporal Patterns of Energy Exchange and Evapotranspiration during an Intense Drought for Drylands in Brazil. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 85, p. 1–11, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.101982>. Acesso em: 02 ago. 2023.

FASSONI-ANDRADE, Alice César *et al.* Amazon Hydrology From Space: Scientific Advances and Future Challenges. **Reviews of Geophysics**, v. 59, p. 1–97, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2020RG000728>. Acesso em: 15 maio 2023.

GAO, Bocai. NDWI—A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water from Space. **Remote Sensing of Environment**, v. 58, p. 257–266, 1996. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3). Acesso em: 01 jul. 2023.

GETIRANA, Augusto. Extreme water deficit in Brazil detected from space. **Journal of Hydrometeorology**, p. 591-599, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1175/JHM-D-15-0096.1>. Acesso em: 18 ago. 2023.

HOOD, William W.; WILSON, Concepción S. The Literature of Bibliometrics, Scientometrics, and Informetrics. **Scientometrics**, v. 52, p. 291–314, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1023/A:1017919924342>. Acesso em: 23 mar. 2023.

HUETE, Alfredo R. A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v. 25, p. 295–309, 1988. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X). Acesso em: 02 jun. 2023.

HUNKE, Philip *et al.* The Brazilian Cerrado: Assessment of Water and Soil Degradation in Catchments under Intensive Agricultural Use. **Ecohydrology**, v. 8, p. 1154–1180, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/eco.1573>. Acesso em: 02 jun. 2023.

JAVADIAN, Mostafa *et al.* Global Trends in Evapotranspiration Dominated by Increases across Large Cropland Regions. **Remote Sensing**, v. 12, p. 1–18, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs12071221>. Acesso em: 11 jul. 2023.

JOSÉ, Jefferson Vieira *et al.* Quantification of Cotton Water Consumption by Remote Sensing. **Geocarto International**, v. 35, p. 1800–1813, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10106049.2019.1583777>. Acesso em: 15 set. 2023.

JUNG, Hahn Chul *et al.* Uncertainties in Evapotranspiration Estimates over West Africa. **Remote Sensing**, v. 11, p. 1–16, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs11080892>. Acesso em: 23 ago. 2023.

KÄFER, Pâmela Suélen *et al.* Artificial neural networks model based on remote sensing to retrieve evapotranspiration over the Brazilian Pampa. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 14, p. 1-20, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1117/1.JRS.14.038504>. Acesso em: 02 set. 2023.

KÄFER, Pâmela Suélen *et al.* Assessing uncertainties in estimating surface energy fluxes from remote sensing over natural grasslands in Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 148, p. 751-765, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03869-6>. Acesso em: 02 ago. 2023.

KAYSER, Rafael Henrique *et al.* Assessing geeSEBAL automated calibration and meteorological reanalysis uncertainties to estimate evapotranspiration in subtropical humid climates. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 314, p. 1-16, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108775>. Acesso em: 30 jul. 2023.

KHAND, Kul *et al.* Dry Season Evapotranspiration Dynamics over Human-Impacted Landscapes in the Southern Amazon Using the Landsat-Based METRIC Model. **Remote Sensing**, v. 9, p. 1–20, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs9070706>. Acesso em: 01 ago. 2023.

LAIPELT, Leonardo *et al.* Long-Term Monitoring of Evapotranspiration Using the SEBAL Algorithm and Google Earth Engine Cloud Computing. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 178, p. 81–96, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.05.018>. Acesso em: 02 set. 2023.

LIMA, João G. A. *et al.* Evapotranspiration of Sorghum from the Energy Balance by METRIC and STSEB. **Rev. bras. eng. agríc. ambient.**, v. 24, p. 24–30, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v24n1p24-30>. Acesso em: 08 ago. 2023.

LIU, Qi *et al.* Monitoring Drought Using Composite Drought Indices Based on Remote Sensing. **Science of The Total Environment**, v. 711, p. 1–10, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134585>. Acesso em: 06 set. 2023.

LOARIE, Scott R. *et al.* Direct Impacts on Local Climate of Sugar-Cane Expansion in Brazil. **Nature Clim Change**, v. 1, p. 105–109, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/nclimate1067>. Acesso em: 10 set. 2023.

MAEDA, Eduardo Eiji *et al.* Evapotranspiration Seasonality across the Amazon Basin. **Earth System Dynamics**, v. 8, p. 439–454, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/esd-8-439-2017>. Acesso em: 12 set. 2023.

MALHADO, Ana C. M. *et al.* Geographic and Temporal Trends in Amazonian Knowledge Production. **Biotropica**, v. 46, p. 6–13, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/btp.12079>. Acesso em: 01 jul. 2023.

MAPBIOMAS. Available online: <https://mapbiomas-br-site.s3.amazonaws.com/Infograficos/Cole%C3%A7%C3%A3o%207.1/MBI-Infograficos-7.1-cerrado-BR.jpg> (accessed on 22 June 2023).

MARENGO, Jose A. *et al.* Changes in Climate and Land Use Over the Amazon Region: Current and Future Variability and Trends. **Frontiers in Earth Science**, v. 6, p. 1–21, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00228>. Acesso em: 12 ago. 2023.

MARIANO, Denis A. *et al.* Use of Remote Sensing Indicators to Assess Effects of Drought and Human-Induced Land Degradation on Ecosystem Health in Northeastern Brazil. **Remote Sensing of Environment**, v. 213, p. 129–143, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.04.048>. Acesso em: 03 maio 2023.

MCMANUS, Concepta; BAETA NEVES, Abilio Afonso. Funding Research in Brazil. **Scientometrics**, v. 126, p. 801–823, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11192-020-03762-5>. Acesso em: 30 jun. 2023.

MELO, Davi C. D. *et al.* Are Remote Sensing Evapotranspiration Models Reliable Across South American Ecoregions?. **Water Resources Research**, v. 57, p. 1–23, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2020WR028752>. Acesso em: 02 maio 2023.

MENESES, Paulo Roberto; ALMEIDA, Tati de. Aritmética de bandas. In: MENESES, Paulo Roberto; ALMEIDA, Tati de (Org.). **Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto**, 1ª ed., Brasília: Universidade de Brasília, 2012, p. 138–153.

MINGERS, John; LEYDESDORFF, Loet. A Review of Theory and Practice in Scientometrics. **European Journal of Operational Research**, v. 246, p. 1–19, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.04.002>. Acesso em: 15 ago. 2023.

MOREIRA, Adriana Aparecida *et al.* Assessment of Terrestrial Water Balance Using Remote Sensing Data in South America. **Journal of Hydrology**, v. 575, p. 131–147, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.05.021>. Acesso em: 15 ago. 2023.

NÓBREGA, Rodolfo L. B. *et al.* Effects of Conversion of Native Cerrado Vegetation to Pasture on Soil Hydro-Physical Properties, Evapotranspiration and Streamflow on the Amazonian Agricultural Frontier. **PLOS ONE**, v. 12, p. 1–22, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0179414>. Acesso em: 02 ago. 2023.

NUMATA, Izaya *et al.* Evaluation of Landsat-Based METRIC Modeling to Provide High-Spatial Resolution Evapotranspiration Estimates for Amazonian Forests. **Remote Sensing**, v. 9, p. 1–19, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs9010046>. Acesso em: 16 ago. 2023.

OLIVEIRA, Bruno Silva *et al.* Improved Albedo Estimates Implemented in the METRIC Model for Modeling Energy Balance Fluxes and Evapotranspiration over Agricultural and Natural Areas in the Brazilian Cerrado. **Remote Sensing** 2018, v. 10, p. 1–27, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs10081181>. Acesso em: 05 set. 2023.

OLIVEIRA, Paulo Tarso S. *et al.* Trends in Water Balance Components across the Brazilian Cerrado. **Water Resources Research** 2014, v. 50, p. 7100–7114, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/2013WR015202>. Acesso em: 02 jun. 2023.

OVERBECK, Gerhard E. *et al.* Conservation in Brazil Needs to Include Non-Forest Ecosystems. **Diversity and Distributions**, v. 21, p. 1455–1460, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/ddi.12380>. Acesso em: 14 jul. 2023.

PACA, Victor Hugo da Motta *et al.* Remote Sensing Products Validated by Flux Tower Data in Amazon Rain Forest. **Remote Sensing**, v. 14, p. 1–20, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs14051259>. Acesso em: 30 maio 2023.

PACA, Victor Hugo da Motta *et al.* The Spatial Variability of Actual Evapotranspiration across the Amazon River Basin Based on Remote Sensing Products Validated with Flux Towers. **Ecological Processes**, v. 8, p. 1–20, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s13717-019-0158-8>. Acesso em 30 abr. 2023.

PENATTI, Natasha Costa *et al.* Satellite-based hydrological dynamics of the world's largest continuous wetland. **Remote Sensing of Environment**, v. 170, p. 1–13, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.08.031>. Acesso em: 30 maio 2023.

PEREIRA, Gabriel *et al.* Improving precipitation simulation from updated surface characteristics in South America. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 129, p. 521–538, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1800-3>. Acesso em 12 abr. 2023.

PINHEIRO, Jean Reinildes *et al.* Effect of Urbanization on Energy Balance and Evapotranspiration in an Amazon–Cerrado Transition Region in Brazil. **JARS**, v. 16, p. 1–17, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1117/1.JRS.16.044516>. Acesso em 02 set. 2023.

PLATAFORMA SUCUPIRA. Available online: <https://sucupira.capes.gov.br/sucupira/public/consultas/coleta/programa/quantitativos/quantitativos.jsf?areaAvaliacao=49&areaConhecimento=90500008> (accessed on 12 June 2023).

RAMPAZO, Núria Aparecida Miatto *et al.* Water Consumption Modeling by Coupling MODIS Images and Agrometeorological Data for Sugarcane Crops. **Sugar Tech**, v. 23, p. 524–535, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12355-020-00919-7>. Acesso em: 01 out. 2023.

REBELLO, Vitor Paiva Alcoforado *et al.* Spatiotemporal vegetation response to extreme droughts in eastern Brazil. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 18, p. 1–12, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100294>. Acesso em: 22 set. 2023.

RETH, Sascha *et al.* Lysimeter. In: **Springer handbook of atmospheric measurements**. Cham: Springer International Publishing, p. 1569-1584, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-030-52171-4_58. Acesso em: 03 set. 2023.

RIBEIRO, Rayssa Balieiro *et al.* Streamflow Regionalization Considering Water Balance with Actual Evapotranspiration Estimated from Remote Sensing. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 27, p. 1–14, 2022. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0002183](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0002183). Acesso em: 05 ago. 2023.

RODELL, Matthew *et al.* Estimating Evapotranspiration Using an Observation Based Terrestrial Water Budget. **Hydrological Processes**, v. 25, p. 4082–4092, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/hyp.8369>. Acesso em: 15 jul. 2023.

RODRIGUES, Ariane A. *et al.* Cerrado Deforestation Threatens Regional Climate and Water Availability for Agriculture and Ecosystems. **Global Change Biology**, v. 28, p. 6807–6822, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/gcb.16386>. Acesso em: 10 jul. 2023.

RUHOFF, Anderson *et al.* Global Evapotranspiration Datasets Assessment Using Water Balance in South America. **Remote Sensing**, v. 14, p. 1–22, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs14112526>. Acesso em: 15 ago. 2023.

SAATCHI, Sassan *et al.* Detecting Vulnerability of Humid Tropical Forests to Multiple Stressors. **One Earth**, v. 4, p. 988–1003, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.06.002>. Acesso em: 03 jul. 2023.

SANTOS, Ana Beatriz *et al.* A Remote Sensing Diagnosis of Water Use and Water Stress in a Region with Intense Irrigation Growth in Brazil. **Remote Sensing**, v. 12, p. 1–16, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs12223725>. Acesso em: 13 ago. 2023.

SANTOS, Jannaylton Everton Oliveira *et al.* Performance of SAFER Evapotranspiration Using Missing Meteorological Data. **Agricultural Water Management**, v. 233, p. 1–8, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106076>. Acesso em: 12 set. 2023.

SCHWARTZMAN, Simon. Pesquisa e Pós-Graduação no Brasil: duas faces da mesma moeda? **Estudos avançados**, v. 36, p. 227-254, 2022. <https://doi.org/10.1590/s0103-4014.2022.36104.011>. Acesso em: 16 jul. 2023.

SILVA, Diego Castro da *et al.* Principal Component Analysis and Biophysical Parameters in the Assessment of Soil Salinity in the Irrigated Perimeter of Bahia, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 112, p. 1–9, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103580>. Acesso em:

SIQUEIRA, Vinícius A. *et al.* Toward Continental Hydrologic–Hydrodynamic Modeling in South America. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 22, p. 4815–4842, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/hess-22-4815-2018>. Acesso em: 06 jul. 2023.

SPERA, Stephanie A. *et al.* Land-Use Change Affects Water Recycling in Brazil’s Last Agricultural Frontier. **Global Change Biology**, v. 22, p. 3405–3413, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/gcb.13298>. Acesso em: 21 ago. 2023.

STAAL, Arie *et al.* Feedback between Drought and Deforestation in the Amazon. **Environ. Res. Lett.**, v. 15, p. 1–9, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab738e>. Acesso em: 17 set. 2023.

TEIXEIRA, Antônio H. de C. Determining Regional Actual Evapotranspiration of Irrigated Crops and Natural Vegetation in the São Francisco River Basin (Brazil) Using Remote Sensing and Penman-Monteith Equation. **Remote Sensing**, v. 2, p. 1287–1319, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs0251287>. Acesso em: 03 maio 2023.

TEIXEIRA, Antônio H. de C. *et al.* Water Productivity Assessments for Dwarf Coconut by Using Landsat 8 Images and Agrometeorological Data. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 155, p. 150–158, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.07.006>. Acesso em: 15 jun. 2023.

TEIXEIRA, Antônio H. de C. *et al.* Use of MODIS Images to Quantify the Radiation and Energy Balances in the Brazilian Pantanal. **Remote Sensing of Solar Surface Radiation**, v. 7, p. 14597-14619, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs71114597>. Acesso em: 14 ago. 2023.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**, 4 ed.; ABRH: Porto Alegre, Brazil, 2012; 944 p.

VERGOPOLAN, Noemi; FISHER, Joshua B. The impact of deforestation on the hydrological cycle in Amazonia as observed from remote sensing. **International Journal of Remote Sensing**, v. 37, p. 5412-5430, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1232874>. Acesso em: 16 jul. 2023.

ZEMP, Delphine Clara *et al.* Deforestation Effects on Amazon Forest Resilience. **Geophysical Research Letters**, v. 44, p. 6182–6190, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/2017GL072955>. Acesso em: 12 maio 2023.

ZHOU, Decheng *et al.* Croplands Intensify Regional and Global Warming According to Satellite Observations. **Remote Sensing of Environment**, v. 264, p. 1–18, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112585>. Acesso em: 03 jul. 2023.

APÊNDICE A

Script para software RStudio, utilizado para unir os registros das bases indexadoras e filtrá-los.

```
if(!require(pacman)) install.packages("pacman")
library(pacman)
pacman::p_load(bibliometrix, readr, writexl, dplyr) #Pacotes utilizados no script

setwd ("D:/Cienciometria") # Indicar a pasta onde será salvo o script

# Carregar arquivo scopus
Scopus <- convert2df("D:/Cienciometria/scopus.csv", dbsource = "scopus", format = "csv")

# Carregar arquivo web of science
Web <- convert2df("D:/Cienciometria/Web_of_Science.txt", dbsource = "wos", format = "plaintext")

# Carregar arquivo Scielo
Scielo <- convert2df("D:/Cienciometria/Scielo.txt", dbsource = "wos", format = "plaintext")
```

```
# União das duas bases de dados, retirando os duplicados
merge <- mergeDbSources(Scopus, Web, Scielo, remove.duplicated = TRUE)
```

```
#A linha superior remove também tem a função de remover os duplicados, no entanto ainda sobram artigos com DOI duplicado, e essa linha remove o restante dos duplicados de acordo com o DOI
```

```
distinct <- distinct(merge, DI, .keep_all = TRUE)
```

```
# Filtra pelo tipo de registro, nesse caso artigo
filter_1 <- filter(distinct, DT=="ARTICLE")
```

```
#Filtra a linguagem, nesse caso inglês
filter_2 <- filter_1[grepl("ENGLISH", filter_1$LA),]
```

```
#Exportados em xlsx para então importar no biblioshiny
write.xlsx(filter_2, file="D:/Cienciometria/Database.xlsx")
```

```
#Depois de exportar os dados, é importante verificar a igualdade na correspondência dos sobrenomes dos autores e as afiliações, para evitar erros de interpretação. Com a base de dado corrigida então deve carregar no biblioshiny.
biblioshiny()
```

APÊNDICE B

Lista dos 140 artigos com o tema evapotranspiração por sensoriamento remoto no Brasil utilizados na cientometria, com o nome dos autores, título, ano de publicação, revista e DOI.

Autores	DOI	Ano	Revistas
BASTIAANSSEN et al.	10.1023/A:1017967021198	2001	Irrigation and Drainage Systems
FOLHES M; RENNÓ C; SOARES J	10.1016/j.agwat.2009.04.021	2009	Agricultural Water Management
TEIXEIRA A; BASTIAANSSEN W; AHMAD M; BOS M	10.1016/j.agrformet.2008.09.014	2009	Agricultural and Forest Meteorology
TEIXEIRA A; BASTIAANSSEN W; AHMAD M; BOS M	10.1016/j.agrformet.2008.09.016	2009	Agricultural and Forest Meteorology
TEIXEIRA A	10.3390/rs0251287	2010	Remote Sensing
DA COSTA DE M; SEDIYAMA G; SOARES V; GLERIANI J; ANDRADE R	10.1590/S0100-67622011000400009	2011	Revista Arvore
LOARIE S; LOBELL D; ASNER G; MU Q; FIELD C	10.1038/nclimate1067	2011	Nature Climate Change
RODELL M; MCWILLIAMS E; FAMIGLIETTI J; BEAUDOING H; NIGRO J	10.1002/hyp.8369	2011	Hydrological Processes
LATHUILLIÈRE M; JOHNSON M; DONNER S	10.1088/1748-9326/7/2/024024	2012	Environmental Research Letters
RUHOFF A; PAZ A; COLLISCHONN W; ARAGAO L; ROCHA H; MALHI Y	10.3390/rs4030703	2012	Remote Sensing
RUHOFF A; PAZ A; ARAGAO L; MU Q; MALHI Y; COLLISCHONN W; ROCHA H; RUNNING S	10.1080/02626667.2013.837578	2013	Hydrological Sciences Journal
TEIXEIRA A; SCHERER-WARREN M; HERNANDEZ F; ANDRADE R; LEIVAS J	10.3390/rs5115783	2013	Remote Sensing
FERREIRA E; DANTAS A	10.15809/irriga.2014v19n1p73	2014	Irriga
GIONGO P; VETTORAZZI C	10.1590/1807-1929/agriambi.v18n08p833-838	2014	Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental
MONTEIRO P; FONTANA D; DOS S T; ROBERTI D	10.15090/brag.2014.005	2014	Bragantia
OLIVEIRA P; NEARING M; MORAN M; GOODRICH D; WENDLAND E; GUPTA H	10.1002/2013WR015202	2014	Water Resources Research
ANDERSON M; ZOLIN C; HAIN C; SEMMENS K; TUGRUL Y M; GAO F	10.1016/j.jhydrol.2015.01.005	2015	Journal Of Hydrology
DA SILVA B; WILCOX B; DA SILVA V; MONTENEGRO S; DE OLIVEIRA L	10.1002/eco.1580	2015	Ecohydrology
LUCAS M; OLIVEIRA P; MELO D; WENDLAND E	10.1007/s10040-015-1246-1	2015	Hydrogeology Journal
PENATTI N; ALMEIDA T; FERREIRA L; ARANTES A; COE M	10.1016/j.rse.2015.08.031	2015	Remote Sensing of Environment
TEIXEIRA A; PADOVANI C; ANDRADE R; LEIVAS J; VICTORIA D; GALDINO S	10.3390/rs71114597	2015	Remote Sensing
ANDERSON M; ZOLIN C; SENTELHAS P; HAIN C; SEMMENS K; TUGRUL Y M; GAO F; OTKIN J; TETRAULT R	10.1016/j.rse.2015.11.034	2016	Remote Sensing of Environment

ANDRADE R; TEIXEIRA A; LEIVAS J; NOGUEIRA S	10.1590/0034-737X201663060002	2016	Revista Ceres
ARANTES A; FERREIRA L; COE M	10.1016/j.isprsjprs.2016.02.008	2016	Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing
FERREIRA E; MANNAERTS C; DANTAS A; MAATHUIS B	10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v36n6p1176-1185/2016	2016	Engenharia Agrícola
FUZZO D F D S; ROCHA J	10.1117/1.JRS.10.046027	2016	Journal of Applied Remote Sensing
GETIRANA A	10.1175/JHM-D-15-0096.1	2016	Journal of Hydrometeorology
MELO D; SCANLON B; ZHANG Z; WENDLAND E; YIN L	10.5194/hess-20-4673-2016	2016	Hydrology and Earth System Sciences
SPERA S; GOLFORD G; COE M; MACEDO M; MUSTARD J	10.1111/gcb.13298	2016	Global Change Biology
VERGOPOLAN N; FISHER J	10.1080/01431161.2016.1232874	2016	International Journal of Remote Sensing
COAGUILA D; HERNANDEZ F; TEIXEIRA A; FRANCO R; LEIVAS J	10.1590/1807-1929/agriambi.v21n8p524-529	2017	Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental
COELHO V; MONTENEGRO S; ALMEIDA C; SILVA B; OLIVEIRA L; GUSMÃO A; FREITAS E; MONTENEGRO A	10.1016/j.jhydrol.2017.02.054	2017	Journal of Hydrology
DE OLIVEIRA G; BRUNSELL N; MORAES E; SHIMABUKURO Y; BERTANI G; DOS SANTOS T; ARAGAO L	10.1080/01431161.2017.1339924	2017	International Journal of Remote Sensing
KHAND K; NUMATA I; KJAERGAARD J; VOURLITIS G	10.3390/rs9070706	2017	Remote Sensing
NÓBREGA R; GUZHA A; TORRES G; KOVACS K; LAMPARTER G; AMORIM R; COUTO E; GEROLD G	10.1371/journal.pone.0179414	2017	Plos One
NUMATA I; KHAND K; KJAERGAARD J; COCHRANE M; SILVA S	10.3390/rs9010046	2017	Remote Sensing
PEREIRA G; SILVA M; MORAES E; CHIQUETTO J; DA SILVA C F	10.1007/s00704-016-1800-3	2017	Theoretical and Applied Climatology
TEIXEIRA A; LEIVAS J; HERNANDEZ F; FRANCO R	10.1117/1.JRS.11.016030	2017	Journal of Applied Remote Sensing
ZEMP D; SCHLEUSSNER C; BARBOSA H; RAMMIG A	10.1002/2017GL072955	2017	Geophysical Research Letters
BOSQUILIA R; NEALE C; DUARTE S; LONGHI S; FERRAZ S; MULLER-KARGER F; MCCARTHY M	10.1016/j.compag.2018.06.003	2018	Computers and Electronics in Agriculture
DE OLIVEIRA F; MANZIONE R; ALBUQUERQUE F J	10.3390/horticulturae4040044	2018	Horticulturae
DE OLIVEIRA J; FERREIRA D; SAHOO P; SODRE G; DE SOUZA E; QUEIROZ J	10.1007/s12665-018-7411-9	2018	Environmental Earth Sciences
FUZZO D F D S; ROCHA J	10.5935/PAeT.V11.N1.01	2018	Applied Research & Agrotechnology
MARIANO D; SANTOS C; WARDLOW B; ANDERSON M; SCHILTMAYER A; TADESS T; SVOBODA M	10.1016/j.rse.2018.04.048	2018	Remote Sensing of Environment
OLIVEIRA B; MORAES E; CARRASCO-BENAVIDES M; BERTANI G; MATAVELI G	10.3390/rs10081181	2018	Remote Sensing
SIQUEIRA V; PAIVA R; FLEISCHMANN A; FAN F; RUHOFF A; PONTES P; PARIS A; CALMANT S; COLLISCHONN W	10.5194/hess-22-4815-2018	2018	Hydrology and Earth System Sciences
BAKER J; SPRACKLEN D	10.3389/ffgc.2019.00047	2019	Frontiers in Forests and Global Change
BAZAME H; ALTHOFF D; FILGUEIRAS R; CALIJURI M; OLIVEIRA J	10.1007/s12524-019-01024-3	2019	Journal of the Indian Society of Remote Sensing
BOSQUILIA R; NEALE C; DUARTE S; LONGHI S; FERRAZ S; MULLER-KARGER F; MCCARTHY M	10.1016/j.ecohyd.2018.11.001	2019	Ecohydrology & Hydrobiology
BOSQUILIA R; NEALE C; DUARTE S; LONGHI S; FERRAZ S; MULLER-KARGER F	10.1016/j.geoderma.2019.113906	2019	Geoderma
DA SILVA H; GONÇALVES W; BEZERRA B	10.1016/j.jag.2019.01.015	2019	International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation
DE OLIVEIRA G; BRUNSELL N; MORAES E; SHIMABUKURO Y; DOS SANTOS T; VON R C; DE AGUIAR R; ARAGAO L	10.1002/eco.2126	2019	Ecohydrology
DE PAULA A; DA SILVA C; RODRIGUES L; SCHERER-WARREN M	10.1590/S1678-3921.pab2019.v54.00739	2019	Pesquisa Agropecuária Brasileira
DIAS L J; NEIVA R L; ACIOLI I H; FALCO P F	10.1080/01431161.2019.1597304	2019	International Journal of Remote Sensing
FILGUEIRAS R; MANTOVANI E; ALTHOFF D; DIAS S; DA CUNHA F	10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v39nep23-32/2019	2019	Engenharia Agrícola
FILGUEIRAS R; MANTOVANI E; ALTHOFF D; RIBEIRO R; VENANCIO L; DOS SANTOS R	10.15809/irriga.2019v1n1p72-80	2019	Irriga
MANZIONE R; CASTRIGNANO A	10.1016/j.scitotenv.2019.133763	2019	Science of the Total Environment
MOREIRA A; RUHOFF A; ROBERTI D; SOUZA V; DA ROCHA H; DE P R	10.1016/j.jhydrol.2019.05.021	2019	Journal of Hydrology
MOURA M; DOS SANTOS A; PEZZOPANE J; ALEXANDRE R; DA SILVA S; PIMENTEL S; DE ANDRADE M; SILVA F; BRANCO E; MOREIRA T; DA SILVA R; DE CARVALHO J	10.1016/j.scitotenv.2018.09.242	2019	Science of the Total Environment
MUTTI P; DA SILVA L; MEDEIROS S; DUBREUIL V; MENDES K; MARQUES T; LÚCIO P; SANTOS E S C; BEZERRA B	10.1016/j.jag.2018.10.007	2019	International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation
PACA V; ESPINOZA-DÁVALOS G; HESSELS T; MOREIRA D; COMAIR G; BASTIAANSEN W	10.1186/s13717-019-0158-8	2019	Ecological Processes
SILVA C; MANZIONE R; ALBUQUERQUE F J	10.1007/s12665-019-8467-x	2019	Environmental Earth Sciences
SILVA C; MANZIONE R; FILHO J	10.15809/irriga.2019v1n1p48-55	2019	Irriga
SILVA J C; COSTA G; ROSSI F; VALE J; LIMA R; LIMA M; OLIVEIRA-JUNIOR J; TEODORO P; SANTOS R	10.1016/j.envsci.2019.04.006	2019	Environmental Science and Policy
SOUZA V; ROBERTI D; RUHOFF A; ZIMMER T; ADAMATTI D; DE GONÇALVES L; DIAZ M; ALVES R; DE MORAES O	10.3390/w11091911	2019	Water (Switzerland)
TEIXEIRA A; DE MIRANDA F; LEIVAS J; PACHECO E; GARÇON E	10.1016/j.isprsjprs.2019.07.006	2019	Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing

ALVES É; FILGUEIRAS R; RODRIGUES L; DA CUNHA F; ALEMAN C	10.1590/1807-1929/agriambi.v24n12p847-853	2020	Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental
ARAUJO L; TEIXEIRA A; BASSOI L	10.1080/01431161.2019.1688416	2020	International Journal of Remote Sensing
CAIONI C; SILVERIO D; MACEDO M; COE M; BRANDO P	10.3390/rs12030525	2020	Remote Sensing
CUNHA J; PEREIRA T; PEREIRA E; RUFINO I; GALVAO C; VALENTE F; BRASILEIRO F	10.1016/j.cageo.2019.104341	2020	Computers & Geosciences
DA ROCHA N; KAHER P; SKOKOVIC D; VEECK G; DIAZ L; KAISER E; CARVALHO C; CRUZ R; SOBRINO J; ROBERTI D; ROLIM S	10.3390/atmos11101059	2020	Atmosphere
DE OLIVEIRA C J; JOSÉ J; WOLFF W; DE OLIVEIRA N; OLIVEIRA R; RIBEIRO N; COELHO R; DA SILVA T; BONFIM-SILVA E; SCHLICHTING A	10.1016/j.agwat.2020.106037	2020	Agricultural Water Management
DE OLIVEIRA G; CHEN J; MATAVELI G; CHAVES M; RAO J; STERNBERG M; DOS SANTOS T; DOS SANTOS C	10.3390/agronomy10081112	2020	Agronomy-Basel
DOS SANTOS C; MARIANO D; DAS CHAGAS A D N F; DA C D F; DE OLIVEIRA G; SILVA M; DA S L; DA SILVA B; BEZERRA B; SAFA B; DE S M S; NEALE C	10.1016/j.jag.2019.101982	2020	International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation
DOS SANTOS R; DA DIVINCULA J; DE OLIVEIRA K; VENANCIO L; MISSIO M; FILGUEIRAS R; DA CUNHA F; ALEMAN C	10.5433/1679-0359.2020v41n2p435	2020	Semina-Ciencias Agrarias
FRANCO A; OLIVEIRA D; BONUMÁ N	10.1080/02626667.2020.1810252	2020	Hydrological Sciences Journal
FUZZO D D S ; CARLSON T; KOURGIALAS N; PETROPOULOS G	10.1007/s12145-019-00424-w	2020	Earth Science Informatics
IVO I; BIUDES M; VOURLITIS G; MACHADO N; MARTIM C	10.1016/j.rsase.2020.100342	2020	Remote Sensing Applications-Society and Environment
JAVADIAN M; BEHRANGI A; SMITH W; FISHER J	10.3390/rs12071221	2020	Remote Sensing
JOSÉ J; OLIVEIRA N; SILVA T; BONFIM-SILVA E; COSTA J; FENNER W; COELHO R	10.1080/10106049.2019.1583777	2020	Geocarto International
KAHER P; DA ROCHA N; DIAZ L; KAISER E; SANTOS D; VEECK G; ROBERTI D; ROLIM S; DE OLIVEIRA G	10.1117/1.JRS.14.038504	2020	Journal of Applied Remote Sensing
LAIPILT L; RUHOFF A; FLEISCHMANN A; BLOEDOW K R; KICH E; ROCHA H; USHER N C	10.3390/rs12071108	2020	Remote Sensing
LIMA J; SÁNCHEZ J; PIQUERAS J; SOBRINHO J; VIANA P; DA SILVA A A	10.1590/1807-1929/agriambi.v24n1p24-30	2020	Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental
MACHADO N; BIUDES M; ANGELINI L; QUERINO C; DA SILVA A P	10.1016/j.rsase.2020.100373	2020	Remote Sensing Applications: Society and Environment
MAGNONI P; SILVA C; MANZIONE R	10.1007/s40899-020-00469-6	2020	Sustainable Water Resources Management
REBELLO V; GETIRANA A; ROTUNNO O; LAKSHMI V	10.1016/j.rsase.2020.100294	2020	Remote Sensing Applications-Society and Environment
SANTOS A; COSTA M; MANTOVANI E; BONINSENHA I; CASTRO M	10.3390/rs12223725	2020	Remote Sensing
SANTOS J; CUNHA F; FILGUEIRAS R; SILVA G; CASTRO T A; SANTOS S F; SEDIYAMA G	10.1016/j.agwat.2020.106076	2020	Agricultural Water Management
SARMIENTO C; COLTRI P; ALVES M; DE CARVALHO L	10.1590/1809-4430-ENG.AGRIC.V40N3P405-412/2020	2020	Engenharia Agrícola
STAAL A; FLORES B; AGUIAR A; BOSMANS J; FETZER I; TUINENBURG O	10.1088/1748-9326/ab738e	2020	Environmental Research Letters
TEIXEIRA A; LEIVAS J; GARÇON E; TAKEMURA C; QUARTAROLI C; ALVAREZ I	10.1007/s00484-020-01996-9	2020	International Journal of Biometeorology
TEIXEIRA A; TAKEMURA C; LEIVAS J; PACHECO E; BAYMA-SILVA G; GARÇON E	10.1016/j.rsase.2020.100296	2020	Remote Sensing Applications: Society and Environment
TITO T; DELGADO R; DE CARVALHO D; TEODORO P; DE A C; DA SILVA JUNIOR C; DOS SANTOS E; DA SILVA JÚNIOR L	10.1007/s10661-020-08421-z	2020	Environmental Monitoring and Assessment
VENANCIO L; MANTOVANI E; DO AMARAL C; NEALE C; FILGUEIRAS R; GONÇALVES I; DA CUNHA F	10.1590/1678-992x-2019-0261	2020	Scientia Agrícola
ADORNO B; BARREIRO S; FERREIRA M; VELOSO G	10.1590/1983-40632021v5165815	2021	Pesquisa Agropecuaria Tropical
ALCÂNTARA C J; NAVARRO-HEVIA J; COSTA C; DE ARAÚJO J	10.1002/hyp.14070	2021	Hydrological Processes
ANGELINI L; BIUDES M; MACHADO N; GELI H; VOURLITIS G; RUHOFF A; NOGUEIRA J	10.3390/s21217196	2021	Sensors
BAKER J; GARCIA-CARRERAS L; GLOOR M; MARSHAM J; BUERMANN W; DA ROCHA H; NOBRE A; DE ARAUJO A; SPRACKLEN D	10.5194/hess-25-2279-2021	2021	Hydrology and Earth System Sciences
BOSQUILIA R; NEALE C; DUARTE S; FERRAZ S; BARROS P; MULLER-KARGER F	10.15809/irriga.2021v26n3p460-475	2021	Irriga
BRUNSELL N; DE OLIVEIRA G; BARLAGE M; SHIMABUKURO Y; MORAES E; ARAGÃO L	10.1007/s00704-020-03435-6	2021	Theoretical and Applied Climatology
CAVIGLIA-HARRIS J; BIGGS T; FERREIRA E; HARRIS D; MULLAN K; SILLS E	10.1016/j.worlddev.2021.105607	2021	World Development
COSTA T; SANTOS R; SANTOS R; FILGUEIRAS R; DA CUNHA F; DE J P A; DE S R	10.5433/1679-0359.2021v42n4p2181	2021	Semina: Ciencias Agrarias
DE ANDRADE B; DE ANDRADE P E; RUHOFF A; SENAY G	10.1016/j.jag.2021.102298	2021	International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation

DE OLIVEIRA G; BRUNSELL N; CHEN J; SHIMABUKURO Y; MATAVELI G; DOS SANTOS C; STARK S; DE LIMA A; ARAGAO L	10.1029/2020JG005833	2021	Journal of Geophysical Research-Biogeosciences
DIAS S; FILGUEIRAS R; FILHO E; ARCANJO G; DA SILVA G; MANTOVANI E; DA CUNHA F	10.1371/journal.pone.0245834	2021	Plos One
GOMES R; DANELICHEN V; BIUDES M; SOUZA M; DE FIGUEIREDO J; NOGUEIRA J	10.26848/rbgf.v14.3.p1805-1814	2021	Revista Brasileira De Geografia Física
JAAFAR H; MOURAD R	10.3390/rs13040773	2021	Remote Sensing
LAIPELT L; HENRIQUE B K R; SANTOS F A; RUHOFF A; BASTIAANSSEN W; ERICKSON T; MELTON F	10.1016/j.isprsjprs.2021.05.018	2021	Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing
LOPES J; RODRIGUES L; SCHERER-WARREN M; DE PAULA A; FERREIRA T	10.15809/irriga.2021v26n3p476-489	2021	Irriga
MELO D; ANACHE J; BORGES V; MIRALLES D; MARTENS B; FISHER J; NOBREGA R; MORENO A; CABRAL O; RODRIGUES T; BEZERRA B; SILVA C; NETO A; MOURA M; MARQUES T; CAMPOS S; NOGUEIRA J; ROSOLEM R; SOUZA R; ANTONINO A; HOLL D; GALLEGUILLAS M; PEREZ-QUEZADA J; VERHOEF A; KUTZBACH L; LIMA J; SOUZA E; GASSMAN M; PEREZ C; TONTI N; POSSE G; RAINS D; OLIVEIRA P; WENDLAND E	10.1029/2020WR028752	2021	Water Resources Research
OLIVEIRA A; FLEISCHMANN A; PAIVA R	10.1016/j.jhydrol.2021.126184	2021	Journal of Hydrology
RAMPAZO N; PICOLI M; DE CASTRO T A; CAVALIERO C	10.1007/s12355-020-00919-7	2021	Sugar Tech
RODRIGUES I; COSTA C; NETO I; HOPKINSON C	10.1016/j.jhydrol.2021.126473	2021	Journal of Hydrology
RODRIGUES I; COSTA C; RAABE A; MEDEIROS P; DE ARAÚJO J	10.1016/j.scitotenv.2021.149059	2021	Science of the Total Environment
SAATCHI S; LONGO M; XU L; YANG Y; ABE H; ANDRE M; AUKEMA J; CARVALHAIS N; CADILLO-QUIROZ H; CERBU G; CHERNELA J; COVEY K; SANCHEZ-CLAVIJO L; CUBILLOS I; DAVIES S; DE S V; DE V F; DUQUE A; DURIEUX A; FERNANDES K; FERNANDEZ L; GAMMINO V; GARRITY D; GIBBS D; GIBBON L; GOWAE G; HANSEN M; HARRIS N; HEALEY S; HILTON R; JOHNSON C; KANKEU R; LAPORTE-GOETZ N; LEE H; LOVEJOY T; LOWMAN M; LUMBUEANAM R; MALHI Y; MARTINEZ J; NOBRE C; PELLEGRINI A; RADACHOWSKY J; ROMAN F; RUSSELL D; SHEIL D; SMITH T; SPENCER R; STOLLE F; TATA H; TORRES D; TSHIMANGA R; VARGAS R; VENTER M; WEST J; WIDAYATI A; WILSON S; BRUMBY S; ELMORE A	10.1016/j.oneear.2021.06.002	2021	One Earth
SANTAROSA L; GASTMANS D; SITOLINI T; KIRCHHEIM R; BETANCUR S; DE OLIVEIRA M; CAMPOS J; MANZIONE R	10.1007/s12665-021-09382-3	2021	Environmental Earth Sciences
SILVA D; LOPES P; SILVA M; MOURA G; NASCIMENTO C; BRITO J; FRANÇA E S Ê; ROLIM M; LIMA R	10.1016/j.jsames.2021.103580	2021	Journal of South American Earth Sciences
SILVA T; GUERRA H; DA SILVA B; SANTOS C; GUIMARÃES J; DOS SANTOS J	10.1590/1807-1929/agriambi.v25n3p149-155	2021	Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental
VILANOVA R; DELGADO R; DE ANDRADE C; DOS SANTOS G; MAGISTRALI I; DE OLIVEIRA C; TEODORO P; CAPRISTO-SILVA G; DA SILVA JUNIOR C; RODRIGUES R	10.1016/j.rsase.2021.100531	2021	Remote Sensing Applications-Society and Environment
ZHANG S; FOERSTER S; MEDEIROS P; DE A J; DUAN Z; BRONSTERT A; WASKE B	10.1016/j.scitotenv.2021.147711	2021	Science of the Total Environment
ZHOU D; XIAO J; FROLKING S; LIU S; ZHANG L; CUI Y; ZHOU G	10.1016/j.rse.2021.112585	2021	Remote Sensing of Environment
BARBOSA L; COELHO V; GUSMÃO A; FERNANDES L; DA SILVA B; DE O G C; CAICEDO N; DA PAZ A; XUAN Y; BERTRAND G; MELO DE C D; MONTENEGRO S; OSWALD S; DAS N A C	10.1016/j.jhydrol.2022.127503	2022	Journal of Hydrology
BISPO R; HERNANDEZ F; GONÇALVES I; NEALE C; TEIXEIRA A	10.1016/j.agwat.2022.107763	2022	Agricultural Water Management
BIUDES M; GELI H; VOURLITIS G; MACHADO N; PAVÃO V; DOS SANTOS L; QUERINO C	10.3390/rs14102482	2022	Remote Sensing
DA COSTA L; SANTOS G; PANOSSO A; ROLIM G; LA S N	10.1186/s13021-022-00209-7	2022	Carbon Balance and Management
DA COSTA L; DE ARAÚJO S G; DE MENDONÇA G; MORAIS F L; DE MENESES K; ROLIM DE S G; LA S J N	10.1007/s10668-021-01677-6	2022	Environment, Development and Sustainability
DE MOURA NETO A; FERNANDES G; LOPES J; LIMA E; LOPES P; RODRIGUES L; GONÇALVES J A	10.1016/j.jsames.2022.104084	2022	Journal of South American Earth Sciences
DE OLIVEIRA M; DOS SANTOS C; DE OLIVEIRA G; SILVA M; DA SILVA B; CUNHA J; RUHOFF A; SANTOS C	10.1016/j.scitotenv.2022.155490	2022	Science of the Total Environment
DE SOUSA J M; FONSECA L; BENDINI H	10.3390/rs14235929	2022	Remote Sensing
DOS SANTOS R; MANTOVANI E; FERNANDES E; FILGUEIRAS R; LOURENCO R; BUFON V; NEALE C	10.3390/atmos13091518	2022	Atmosphere
GONÇALVES I; RUHOFF A; LAIPELT L; BISPO R; HERNANDEZ F; NEALE C; TEIXEIRA A; MARIN F	10.1016/j.agwat.2022.107965	2022	Agricultural Water Management
JARDIM A; ARAÚJO J G; DA SILVA M; DOS SANTOS A; DA SILVA J; PANDORFI H; DE OLIVEIRA-JÚNIOR; TEIXEIRA A; TEODORO P; DE L J; DA SILVA JÚNIOR C; DE S L; SILVA E; DA S T	10.3390/rs14081911	2022	Remote Sensing

KAFER P; DA ROCHA N; VEECK G; DIAZ L; DA COSTA S; KAISER E; ROBERTI D; ROLIM S	10.1007/s00704-021-03869-6	2022	Theoretical and Applied Climatology
KAYSER R; RUHOFF A; LAIPELT L; KICH E; ROBERTI D; SOUZA V; RUBERT G; COLLISCHONN W; NEALE C	10.1016/j.agrformet.2021.108775	2022	Agricultural and Forest Meteorology
PACA V; ESPINOZA-DAVALOS G; DA S R; TAPAJOS R; GASPAR A	10.3390/rs14051259	2022	Remote Sensing
PINHEIRO J; BIUDES M; MACHADO N; PEDREIRA J A; DOS SANTOS L	10.1117/1.JRS.16.044516	2022	Journal of Applied Remote Sensing
RIBEIRO R; PRUSKI F; DE OLIVEIRA J; FILGUEIRAS R; ALTHOFF D; PINTO E	10.1061/(ASCE)HE.1943- 5584.0002183	2022	Journal of Hydrologic Engineering
RODRIGUES A; MACEDO M; SILVERIO D; MARACAHIPES L; COE M; BRANDO P; SHIMBO J; RAJAO R; SOARES B; BUSTAMANTE M	10.1111/gcb.16386	2022	Global Change Biology
RUHOFF A; DE ANDRADE B; LAIPELT L; FLEISCHMANN A; SIQUEIRA V; MOREIRA A; BARBEDO R; CYGANSKI G; FERNÁNDEZ G; BREDÁ J; DE PAIVA R; MELLER A; TEIXEIRA A; ARAUJO A; FUECKNER M; BIGGS T	10.3390/rs14112526	2022	Remote Sensing
WAGNER W; FRANCISCO J; FLUMIGNAN D; MARIN F; FOLEGATTI M	10.1016/j.agwat.2021.107390	2022	Agricultural Water Management

3. ARTIGO 02: SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL (SWAT) NO BRASIL: ANÁLISE DAS PESQUISAS APLICADAS AO CONHECIMENTO, USO E CONSERVAÇÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS NACIONAIS

RESUMO

O modelo SWAT é uma das principais ferramentas de modelagem hidrológica, estratégicas para a gestão de recursos hídricos no Brasil. Devido à diversidade climática e às mudanças no uso do solo no país, sua aplicação é essencial para monitorar os regimes hídricos, os sedimentos e a qualidade da água, auxiliando na formulação de políticas públicas e de estratégias de adaptação às mudanças ambientais. Para compreender as aplicações, a evolução e o alcance dessa ferramenta no cenário nacional, realizou-se uma análise cientométrica. Foram avaliados 119 artigos científicos publicados em periódicos indexados nas bases de dados Scopus e Web of Science, entre 2011 e 2024. Observou-se que as publicações foram realizadas em 62 periódicos, por 396 autores, afiliados a 128 instituições de 19 países. Observa-se a concentração de estudos em regiões hidrológicas e áreas temáticas específicas, com predomínio de pesquisas sobre os impactos do uso do solo na hidrologia e na produção de sedimentos. As principais lacunas estão associadas à modelagem da qualidade da água, visto que a poluição difusa é um tema importante para a hidrologia, em função do enquadramento e dos múltiplos usos da água; além disso, há falta de pesquisas com modelagens SWAT aplicadas em bacias urbanas. Também é notória a falta de integração regional com os países da América do Sul, o que limita o potencial de cooperação para enfrentar desafios hidrológicos comuns. Em geral, observou-se a falta de transparência e de acessibilidade aos dados de entrada, e muitos artigos não apresentam as fontes de dados ou material suplementar suficiente para a replicação, o que dificulta a replicabilidade científica e a disseminação mais ampla do conhecimento por diferentes agentes vinculados à área de recursos hídricos. Portanto, é necessário aprimorar o conhecimento sobre as variáveis de entrada do modelo, com caracterizações, análises de sensibilidade e validações em diferentes condições hidrometeorológicas e em diferentes biomas brasileiros, incluindo a sistematização e a disponibilização de bases de dados (open data). Os estudos ainda estão em fase de maturação quanto à aplicação do SWAT no Brasil; todavia, as tendências, lacunas e possíveis aplicações decorrentes dessa análise podem fortalecer a interface entre a pesquisa, a gestão e as políticas de sustentabilidade da água.

Palavras-chave: modelagem hidrológica; recursos hídricos; Bibliometrix; revisão sistemática.

ABSTRACT

The SWAT model is one of the main hydrological modeling tools strategically applied to water resources management in Brazil. Due to the country's climatic diversity and land use changes, its application is essential for monitoring hydrological regimes, sediment dynamics, and water quality, supporting the development of public policies and environmental adaptation strategies. To understand the applications, evolution, and scope of this tool within the national context, a scientometric analysis was conducted. A total of 119 scientific articles published in journals

indexed in the Scopus and Web of Science databases between 2011 and 2024 were evaluated. The publications were distributed across 62 journals and authored by 396 researchers affiliated with 128 institutions from 19 countries. A concentration of studies was observed in specific hydrological regions and thematic areas, with a predominance of research focused on the impacts of land use on hydrology and sediment yield. The main gaps are associated with water quality modeling, since diffuse pollution is an important issue in hydrology due to water classification standards and the multiple uses of water. In addition, there is a lack of studies applying SWAT modeling to urban watersheds. A notable lack of regional integration with other South American countries was also identified, limiting the potential for cooperation in addressing common hydrological challenges. In general, a lack of transparency and accessibility regarding input data was observed, and many articles do not provide data sources or sufficient supplementary material for replication, which hinders scientific reproducibility and the broader dissemination of knowledge among different stakeholders involved in water resources management. Therefore, it is necessary to improve knowledge regarding the model's input variables through characterization, sensitivity analyses, and validation under different hydrometeorological conditions and across different Brazilian biomes, including the systematization and availability of databases (open data). Studies are still in a maturation phase regarding the application of SWAT in Brazil; however, the trends, gaps, and potential applications identified through this analysis may strengthen the interface between research, management, and water sustainability policies.

Keywords: hydrological modeling; water resources; Bibliometrix; systematic review.

3.1. Introdução

O SWAT (Soil & Water Assessment Tool) é um modelo hidrológico desenvolvido por cientistas do USDA-ARS (Departamento de Agricultura dos Estados Unidos — Serviço de Pesquisa Agrícola), sob a liderança de Jeff Arnold, em parceria com a Texas A&M University. Foi criado com o objetivo de gerir bacias hidrográficas, considerando os efeitos do uso e da cobertura do solo sobre os recursos hídricos (Srinivasan; Arnold, 1994; Neitsch; Arnold; Williams, 2011; Arnold et al., 2012b).

O SWAT é um modelo semidistribuído, de base física, em tempo contínuo. Por sua estrutura semidistribuída, a bacia hidrográfica é subdividida em sub-bacias e, com base na topografia, também é utilizada para classificar as planícies de inundação como unidades de paisagem (Bieger et al., 2017). Cada sub-bacia é então subdividida em Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs), que são essencialmente áreas que compartilham combinações específicas de uso e cobertura do solo, do tipo de solo e da declividade (Arnold et al., 1998; Neitsch; Arnold; Williams, 2011). Dessa forma, os processos hidrológicos são modelados em cada HRU, o que proporciona maior detalhamento na representação da bacia e preserva a eficiência computacional, especialmente em grandes bacias e em longos períodos de simulação.

Além das bases físicas espacialmente distribuídas, o SWAT exige dados pedológicos detalhados e informações climáticas (Arnold et al., 2012b; Abbaspour et al., 2019). Os dados pedológicos incluem a textura do solo, propriedades hidráulicas (condutividade hidráulica saturada, capacidade de campo e ponto de murcha), teor de carbono orgânico, profundidade do solo e densidade aparente (Bouslihim et al., 2025). Quanto às informações climáticas, a precipitação e as temperaturas máximas e mínimas diárias são parâmetros obrigatórios para a simulação dos processos hidrológicos básicos (Dhanesh et al., 2020; Viana et al., 2021; Ferraz et al., 2023). Para os cálculos de balanço energético, dependendo do modelo de evapotranspiração potencial adotado, também são necessários dados de umidade relativa do ar, velocidade do vento e radiação solar (Neitsch; Arnold; Williams, 2011; Ferreira et al., 2021b).

Os diversos parâmetros requeridos pelo SWAT, desde as características pedológicas até as variáveis climáticas, estabelecem as bases para o funcionamento integrado das duas fases do modelo: a fase do terreno e a fase do itinerário do ciclo hidrológico. A fase terrestre utiliza esses dados para calcular os processos de superfície, transformando a precipitação em escoamento, infiltração e evapotranspiração por meio da equação do balanço hídrico. Esses resultados, por sua vez, alimentam diretamente a fase de propagação nos canais, na qual a água e seus constituintes passam a ser transportados pela rede de drenagem (Neitsch; Arnold; Williams, 2011).

Nessa transição entre fases, os mesmos atributos do solo que regulam a infiltração na fase terrestre acabam por influenciar a carga de sedimentos que chega aos canais. Da mesma forma, os dados climáticos que determinam a disponibilidade hídrica inicial acabam por condicionar a dinâmica das cheias e o transporte de poluentes rio abaixo. Essa interligação natural entre os componentes do sistema faz com que cada parâmetro inserido no modelo participe simultaneamente de múltiplos processos, conectando a geração de escoamento em cada HRU ao seu comportamento final na rede hidrográfica como um todo (Neitsch; Arnold; Williams, 2011).

O uso do modelo SWAT tem-se consolidado amplamente na comunidade científica, como demonstram os mais de 5.000 artigos publicados desde o início da década de 1990, período em que o modelo foi criado (Aloui et al., 2023; Janjić; Tadić, 2023). Sua aplicação global abrange bacias hidrográficas temperadas na América do Norte (Zare; Azam; Sauchyn, 2022; Van Riper et al., 2024) e na Europa (Larraz et al., 2024; Marcinkowski; Piniewski, 2024) e regiões tropicais na Ásia (Loukika et al., 2022; Makumbura et al., 2022) e na América do Sul (Junqueira et al., 2022b; Valencia et al., 2023; Dos Santos et al., 2023; Ferreira et al., 2024), incluindo áreas semiáridas na África (Akoko et al., 2021; Gizaw et al., 2022; Arsiso; Mengistu

Tsidu, 2023) e na Austrália (Muhury; Apan; Maraseni, 2024). Essa ampla adoção em contextos geográficos e climáticos tão diversos comprova a capacidade do modelo de se adaptar a diferentes realidades ambientais e de se aplicar a diversos cenários da gestão de recursos hídricos.

Por sua versatilidade, o SWAT também permite realizar inúmeras modelagens hidrológicas e ambientais com objetivos específicos. Entre suas principais aplicações, destacam-se a modelagem de vazão líquida (Abou Rafee et al., 2019; Oliveira et al., 2020; Fujita et al., 2022), a simulação de cenários de mudanças climáticas (Lucas-Borja et al., 2020; Dos Santos et al., 2021; Lins et al., 2024), a análise de serviços ecossistêmicos (Kroeger et al., 2019), a simulação de impactos de mudanças de uso e cobertura da terra (Da Silva et al., 2018; Dos Santos; Proença de Oliveira; Augusto Di Lollo, 2020; Da Silva et al., 2023), a erosão do solo e a descarga sólida (De Oliveira et al., 2019; Mauri et al., 2020; Martins et al., 2021; Viana et al., 2023), bem como a avaliação da qualidade da água (De Mello et al., 2017), entre outras.

A ampla aceitação do modelo evidencia não só sua versatilidade na simulação de processos hidrológicos e ambientais, mas também seu potencial de contribuir para a gestão sustentável dos recursos hídricos em diversas regiões do Brasil. Considerando que o país detém 12% da reserva de água doce do mundo (Brasil, 2014; WWF, 2023; MapBiomass, 2025) e abriga algumas das maiores bacias hidrográficas do mundo – como a Amazônica, a do Paraná e a do São Francisco (ANA, 2022), o uso de ferramentas de modelagem eficientes e robustas é essencial para o conhecimento, o uso e a conservação desse recurso estratégico. Além disso, os modelos hidrológicos, como o SWAT, podem subsidiar políticas públicas que promovam o desenvolvimento e garantam a segurança hídrica (Rodrigues; Gupta; Mendiando, 2014; Siqueira et al., 2021; Dill; Dagios; Barros, 2022; Janjić; Tadić, 2023).

Considerando a relevância do Brasil quanto à disponibilidade de recursos hídricos e a comprovada robustez do modelo SWAT, torna-se importante compreender como a comunidade científica tem empregado essa ferramenta em âmbito nacional. Nesse sentido, a análise da produção científica relacionada ao modelo permite identificar tendências, lacunas e potenciais aplicações, contribuindo para fortalecer a interface entre a pesquisa, a gestão e a formulação de políticas públicas voltadas ao uso sustentável da água. Diante disso, realizamos uma revisão sistemática e análise cientométrica de artigos que utilizaram o modelo SWAT em estudos hidrológicos no território brasileiro, com o objetivo de mapear sua evolução, principais aplicações, recortes geográficos e enfoques temáticos, além de diagnosticar as lacunas existentes e as principais limitações à utilização do modelo no contexto brasileiro.

3.2. Material e métodos

Em setembro de 2024, foi realizada a busca por artigos científicos nas bases indexadoras Scopus e Web of Science, selecionadas devido ao elevado número de periódicos indexados na temática abordada, bem como ao rigor aplicado no controle de políticas editoriais e nos processos de revisão dos manuscritos aceitos para publicação.

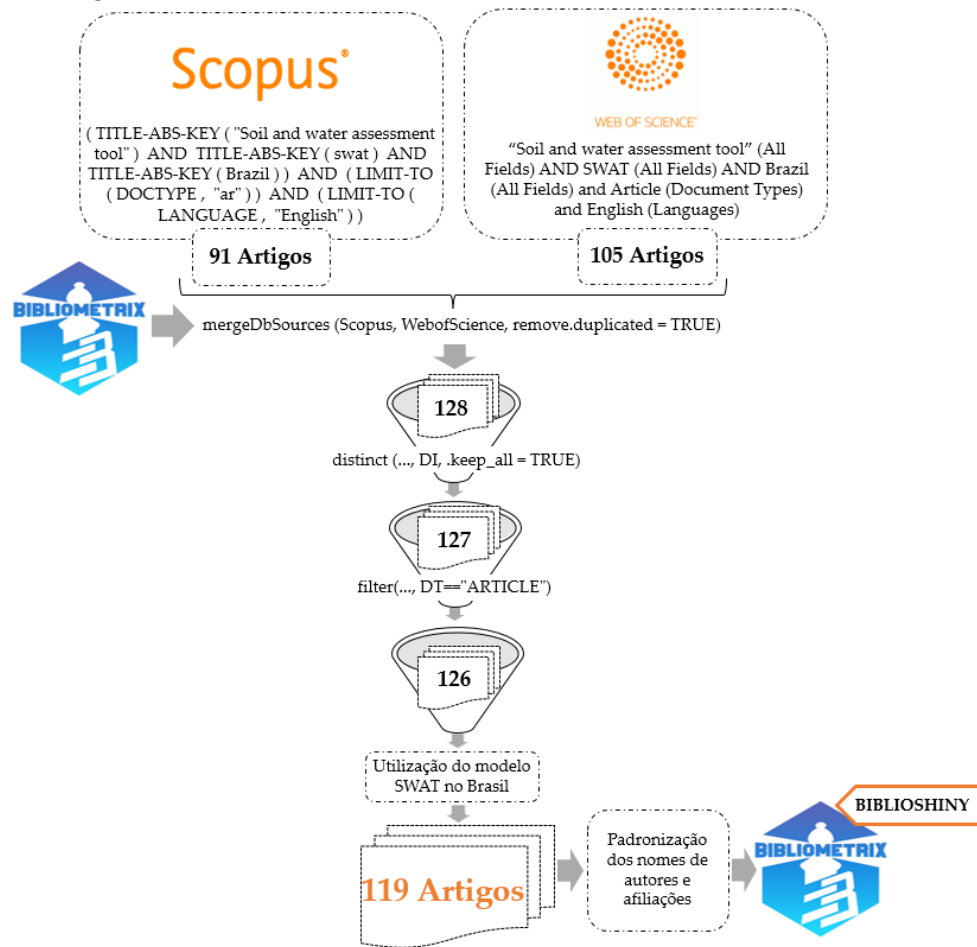
Como filtro nas buscas por documentos, foram utilizadas as terminologias “Soil and Water Assessment Tool” (SWAT) e “Brazil”, aplicando-se o operador booleano AND entre os termos, de modo que ambos estivessem presentes simultaneamente nos documentos recuperados. As buscas também foram limitadas a documentos do tipo artigo, publicados em inglês (Figura 10).

O termo “Soil and Water Assessment Tool” foi inserido entre aspas duplas para que a busca considerasse a expressão completa, enquanto o termo “Brazil” foi mantido em inglês, para ampliar o alcance da busca. A restrição a documentos do tipo artigo justifica-se pela maior rigorosidade do processo de revisão a que esses documentos são submetidos em comparação com outros tipos de publicação.

Considerando esses filtros, foram encontrados 91 documentos na base Scopus e 105 na Web of Science. Os registros de ambas as bases foram importados para o software RStudio, utilizando-se o pacote Bibliometrix, por meio do qual também foi realizada a remoção de documentos duplicados (Castagna et al., 2024), ou seja, artigos publicados em periódicos indexados em ambas as bases, resultando em um total de 128 documentos (Figura 10).

Esses 128 documentos passaram por uma nova filtragem para a exclusão de duplicatas com base no DOI, restando 127. Embora o filtro por tipo de documento já tivesse sido aplicado nas plataformas de busca, foi realizada uma nova verificação, resultando em 126 documentos do tipo artigo. Posteriormente, nos 126 artigos, foi realizada a leitura complementa e identificou-se que cinco artigos não apresentavam a área de estudo no Brasil, um não usava o modelo SWAT e um artigo estava repetido, sobrando dessa forma 119 artigos; em planilha eletrônica, os metadados desses artigos foram submetidos à padronização dos nomes dos autores e das suas afiliações institucionais, com o objetivo de assegurar a conformidade na forma de referência aos sobrenomes e às instituições às quais os autores estão vinculados. Em seguida, o conjunto de registros foi processado no aplicativo Biblioshiny, também pertencente ao pacote Bibliometrix, para a realização da análise cientométrica (Figura 10).

Figura 10. Fluxograma do delineamento da metodologia para a cientometria de artigos que utilizam a modelagem hidrológica SWAT no Brasil.

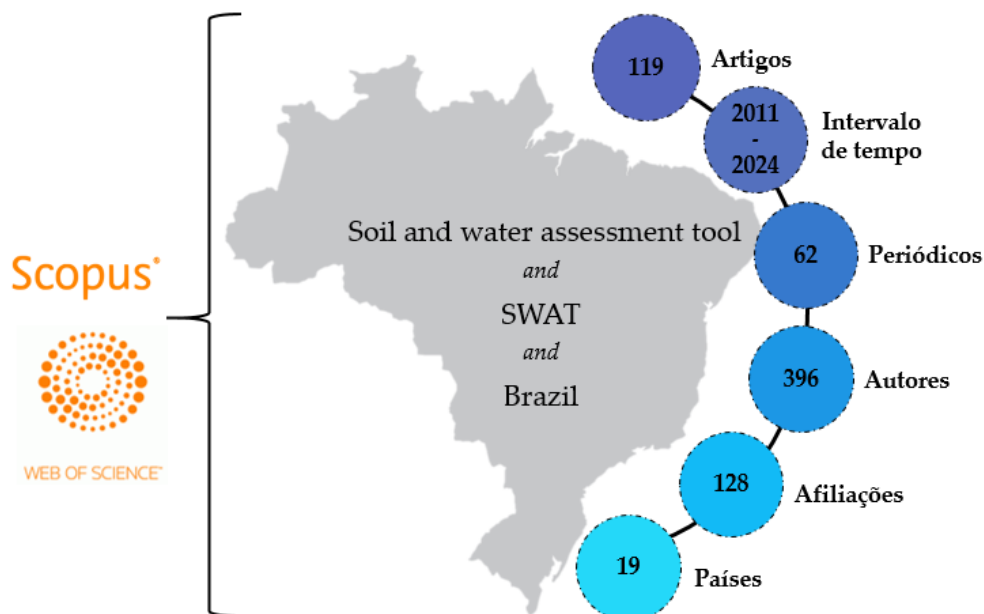


Para avaliar a influência dos artigos ao longo do tempo, foi determinada a média padronizada de citações anuais de cada publicação, calculada como o número total de citações dividido pelo período desde sua divulgação (Bezak et al., 2021). Posteriormente, realizou-se uma análise exploratória imparcial e reprodutível, para localizar, avaliar e sintetizar o conjunto de evidências dos 119 artigos, visando entender as seguintes questões científicas: i) como é a distribuição da produção científica com o modelo SWAT no Brasil (principais autores, instituições e regiões de estudo); ii) quais são os objetivos e temas com aplicação do modelo SWAT no Brasil; iii) como são apresentadas as informações referentes aos dados de entrada (input) do modelo SWAT; iv) quais são as limitações e principais proposições para estudos com o modelo SWAT e os recursos hídricos brasileiros.

3.3. Resultados

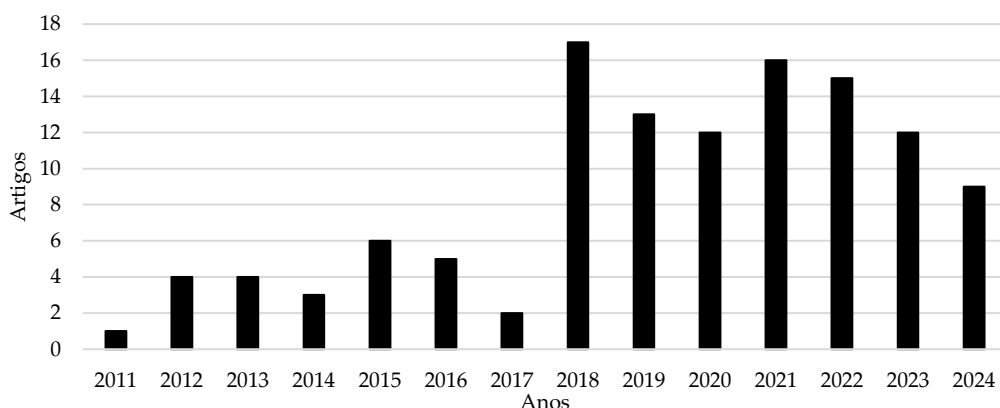
Foram identificados 119 artigos publicados entre 2011 e 2024, em 62 periódicos distintos, com 396 autores, todos afiliados a 128 instituições de 19 países (Figura 11).

Figura 11. Resumo cientométrico dos 119 artigos avaliados que empregaram o modelo SWAT em pesquisas sobre recursos hídricos no Brasil.



Verifica-se que o número de publicações cresceu ao longo do período, com 94% dos artigos concentrados entre 2018 e 2024. Ressalta-se, porém, que o ano de 2024 ainda não havia sido concluído quando a busca nas bases de indexação foi realizada (Figura 12). Tal tendência de crescimento é atribuída ao avanço da infraestrutura tecnológica, que viabiliza o processamento das complexas demandas computacionais do SWAT, somada à consolidação de redes de conhecimento e capacitação técnica sobre o modelo, tornando sua aplicação mais acessível e difundida na literatura especializada.

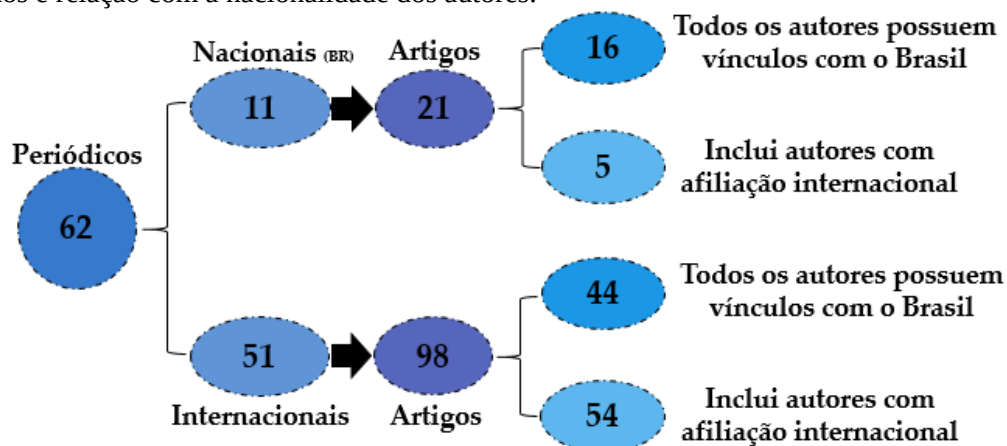
Figura 12. Número de artigos publicados ao longo dos anos que utilizaram ou abordaram o modelo SWAT no Brasil, indexados na Scopus e na Web of Science.



Os artigos foram publicados em 62 periódicos: 11 brasileiros ((21 artigos) e 51 internacionais (98 artigos). Dentre os artigos publicados em periódicos nacionais, apenas cinco têm pelo menos um autor com filiação internacional. Por outro lado, entre os artigos publicados

em periódicos internacionais, 54 incluem pelo menos um autor com filiação internacional, o que representa 55% do total de artigos nesses periódicos (Figura 13).

Figura 13. Periódicos científicos: divisão entre nacionais e internacionais, distribuição dos artigos publicados e relação com a nacionalidade dos autores.



Dos 62 periódicos analisados, 23 (67% do total) contêm dois ou mais artigos indexados em ambas as bases (sem repetições). Esses periódicos abrangem as áreas de conhecimento: multidisciplinar (miscelânea), ciências ambientais e ciências agrárias; outros sete periódicos, têm escopo específico em hidrologia/recursos hídricos: *Ecohydrology* *Hydrobiology* (*Ecohydrol. Hydrobiol.*, 2001), *Hydrological Science Journal* (*Hydrol. Sci. J.*, 1982), *Hydrological Processes* (*Hydrol. Processes*, 1986), *Water Resources Management* (*Water Resour. Manag.*, 1978), *Journal Hydrology-regional Studies* (*J. Hydrol. Reg. Stud.*, 2014), *Journal Hydrology* (*J. Hydrol.*, 1963) e *Water* (2009).

Dos periódicos com dois ou mais artigos, seis são brasileiros: *Engenharia Agrícola* (*Eng. Agric.*, 1972), *Ciência e Agrotecnologia* (*Ciênc. Agrotec.*, 1977), *Revista Brasileira de Ciência do Solo* (*Rev. Bras. Ciênc. Solo*, 1977), *Cerne* (1994), *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* (*Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambient.*, 1997) e *Revista Ambiente e Água* (*Rev. Ambient. Água*, 2013). Esses periódicos apresentam os menores CiteScores (de 0,593 a 2,7) na Scopus e os menores fatores de impacto (de 0,7 a 1,9) na Web of Science. Apenas a *Revista Brasileira de Ciência do Solo* encontra-se à frente de uma revista estrangeira (*Journal of South American Earth Sciences*), com fator de impacto de 1,9. Por outro lado, a *Revista Ambiente e Água* não possui fator de impacto registrado.

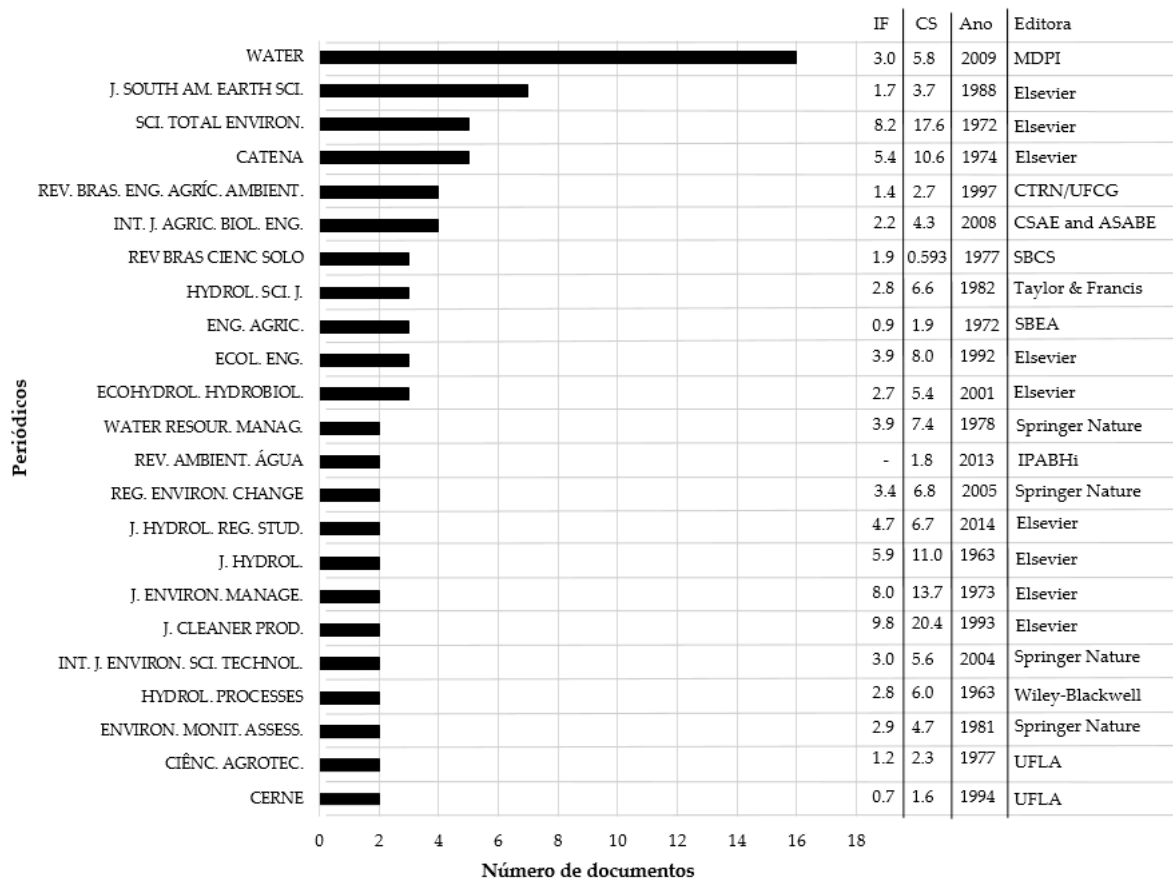
Os periódicos brasileiros supracitados, em geral, são publicados por universidades ou por associações de pesquisa sem fins lucrativos. Os periódicos *Ciênc. Agrotec.* e *Cerne* têm como editora a Universidade Federal de Lavras (UFLA) e a *Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambient.* é publicada pela Universidade Federal de Campina Grande. O periódico *Eng. Agric.* é publicado

pela Associação Brasileira de Engenharia Agrícola (SBEA). O periódico *Rev. Bras. Cienc. Solo* é publicado apenas pela Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (SBCS) e pelo periódico *Rev. Ambient. Água* publicada pelo Instituto de Pesquisas Ambientais em Bacias Hidrográficas (IPABHi) (Figura 14).

Os periódicos internacionais são publicados por editoras de caráter empresarial, com fins lucrativos. Nove periódicos são publicados pela Elsevier, fundada em 1880 em Amsterdã, Holanda, que mantém as plataformas ScienceDirect e Scopus. Quatro periódicos são publicados pela Springer Nature – originalmente fundada como Springer em 1842 na Alemanha, mas que, após a fusão com a Nature Publishing Group em 2015, adotou a denominação atual. Um periódico é publicado pela Taylor & Francis, uma editora britânica fundada em 1852. Um periódico é publicado pela Wiley-Blackwell, resultante da fusão, em 2007, entre a americana John Wiley & Sons (fundada em 1807) e a britânica Blackwell Publishing (fundada em 1922). Por fim, um periódico é publicado pela MDPI (Multidisciplinary Digital Publishing Institute), a mais jovem dentre essas editoras, fundada em 1996 na Suíça. Inclusive, o periódico *Water* apresenta o maior número de artigos (16) sobre a temática específica avaliada nessa pesquisa (Figura 14).

Todos os periódicos citados cobram taxa de publicação (APC - Article Processing Charge), exceto o periódico brasileiro *Cerne*. Os periódicos publicados pelas editoras Elsevier, Springer Nature, Taylor & Francis e Wiley-Blackwell oferecem dois modelos de publicação, o modelo híbrido e o modelo Open Access (OA), e a MDPI publica exclusivamente no modelo Open Access. No modelo híbrido, há três possibilidades: (i) o autor não paga a taxa de APC e o artigo permanece sob paywall, exigindo pagamento para acesso; (ii) o autor paga a APC e apenas seu artigo específico torna-se Open Access; ou (iii) o modelo Open Access puro, em que o autor paga a APC e garante o acesso gratuito imediato a todos os leitores.

Figura 14. Periódicos científicos com dois ou mais artigos publicados entre 2011 e 2024, com respectivos fatores de impacto (IF), CiteScore (CS), ano da primeira publicação do periódico (Year) e editora.



Considerando as citações dos 119 artigos analisados, observou-se a seguinte distribuição: 13 artigos possuem 50 ou mais citações; 39 apresentam entre 20 e 49 citações; 17 artigos estão na faixa de 10 a 19 citações; 42 têm entre 1 e 9 citações; e 8 artigos não registraram citações, sendo estes últimos publicados entre 2022 e 2024, período recente que pode justificar a ausência de citações.

Ao relacionar o número de citações ao longo do período de publicação dos artigos, por meio da citação normalizada por ano (CN), verifica-se que 9 artigos apresentam CN acima de 10, publicados entre 2014 e 2023 (Tabela 3).

O artigo com maior CN (30.5) é de Serrão et al. (2022), que possui 61 citações (Tabela 3). O objetivo do artigo foi avaliar o impacto das mudanças no uso e na cobertura do solo sobre as variáveis hidrossedimentológicas ao longo de 40 anos, analisando a vazão líquida e a produção de sedimentos na bacia hidrográfica do rio Tocantins, bem como identificar tendências nessas variáveis. A inclusão da abordagem da mudança de uso e de cobertura do solo também é observada nos artigos de Dos Santos et al. (2021) e de Da Silva et al. (2018).

Todos os artigos com CN superior a 10, exceto o de Bressiani et al. (2015), utilizam o SWAT como ferramenta para atingir o objetivo do artigo. Em Bressiani et al. (2015), que, além de ser o artigo com o segundo maior CN, também é o artigo com o maior número de citações, apresenta-se uma revisão da literatura sobre o uso e a aplicação do modelo SWAT (Tabela 3).

Nestes artigos (Tabela 3), também é possível identificar redes de coautorias entre os autores. O autor Francisco de Assis Salviano de Sousa, professor titular na Universidade Federal da Campina Grande (UFCG), é coautor em Serrão et al. (2022) e em Da Silva et al. (2018). E Vicente de Paulo Rodrigues da Silva, também professor titular da UFCG, primeiro autor de Da Silva et al. (2018), é coautor de Serrão et al. (2022).

Outros coautores também aparecem de forma recorrente em pelo menos duas publicações, considerando-se apenas os artigos com CN superior a 10. É o caso da professora e pesquisadora da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Nadia Bernardi Bonumá, coautora dos artigos de Bressiani et al. (2015) e de Brighenti et al. (2019). Da mesma forma, Eduardo Mario Mendingo, professor e pesquisador na Universidade de São Paulo (USP), é coautor de (Bressiani et al., 2015) e de (Rodrigues; Gupta; Mendingo, 2014). Assim como Raghavan Srinivasan, que é coautor em Bressiani et al. (2015) e em De Oliveira et al. (2019) (Tabela 3).

Tabela 3. Artigos com média de citações normalizada por ano (CN) superior a 10, publicados nas bases de dados indexadoras Scopus e Web of Science, sobre o uso do SWAT no Brasil.

Autores	DOI	Periódicos	Ano	Citações	CN
SERRÃO E. et al.	10.1016/j.ijsrc.2021.04.002	INT J SEDIMENT RES	2022	61	30.5
BRESSIANI D. et al.	10.3965/j.ijabe.20150803.1765	INT J AGRIC BIOL ENG	2015	169	18.8
DOS SANTOS F. et al.	10.1016/j.catena.2022.106872	CATENA	2023	18	18.0
DOS SANTOS J. et al.	10.1016/j.catena.2021.105308	CATENA	2021	43	14.3
FISHER J. et al.	10.1002/rse2.61	REMOTE SENS ECOL CON	2018	75	12.5
RODRIGUES D. et al.	10.1002/2013WR014274	WATER RESOUR RES	2014	105	10.5
BRIGHENTI T. et al.	10.1016/j.ecoleng.2018.11.007	ECOL ENG	2019	52	10.4
DE OLIVEIRA V. et al.	10.1016/j.ecoleng.2019.04.021	ECOL ENG	2019	52	10.4
DA SILVA V. et al.	10.1016/j.catena.2017.11.024	CATENA	2018	61	10.2

Ao todo, são 396 autores e coautores, dos quais 101 participam de dois ou mais artigos e cinco autores estão presentes em 10 ou mais publicações. O autor que mais figura entre os artigos é Raghavan Srinivasan (Srinivasan, R.), pesquisador da Texas A&M University e um dos desenvolvedores do modelo SWAT, que aparece como coautor em 16 artigos.

O segundo coautor com maior participação nos artigos, totalizando 15, é Celso Augusto Guimarães Santos (Santos, C.), professor e pesquisador da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), mas, diferentemente de Srinivasan, Santos é primeiro autor de dois artigos. Seguido por Carlos Rogério de Mello (De Mello, C.), professor e pesquisador da Universidade Federal

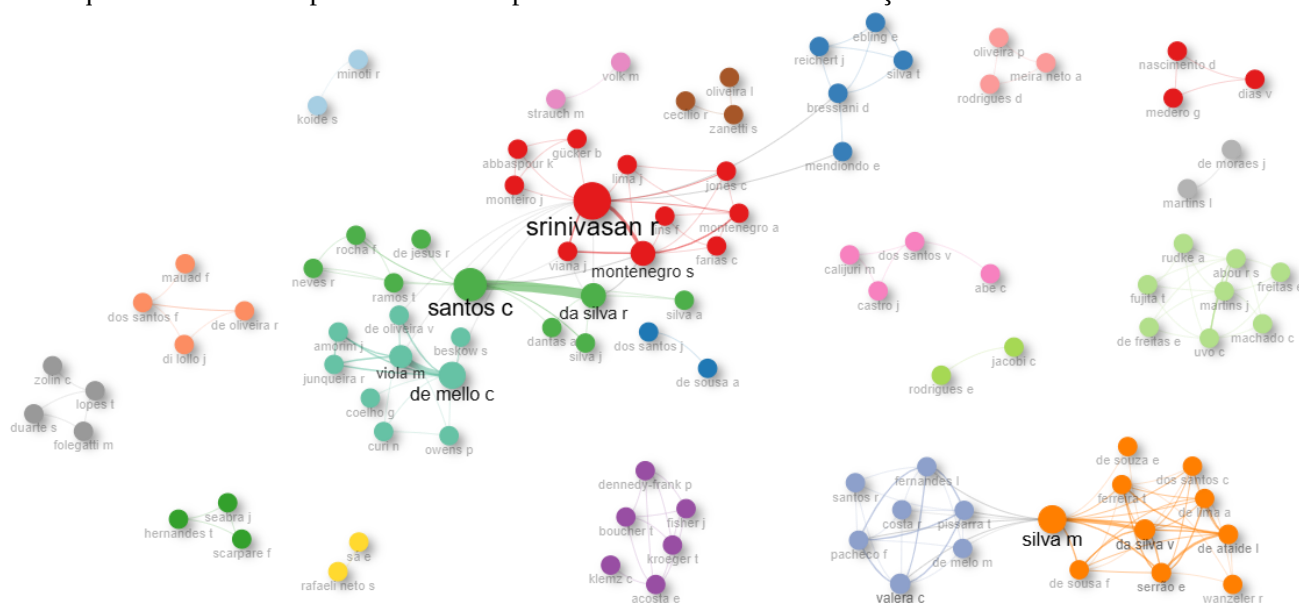
de Lavras (UFLA), figura em 12 publicações e é um dos autores do artigo de 2011 (Durães; Mello; Naghettini, 2011), o mais antigo encontrado pela filtragem empregada. Richarde Marques da Silva (Da Silva, R.), também da UFPB, participa de 10 artigos, assim como Madson Tavares Silva (Silva, M.), professor e pesquisador da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), que também está em 10 publicações.

Na rede de colaboração entre os autores que colaboraram em ao menos dois artigos, é possível identificar os autores mencionados anteriormente como os principais autores de seus respectivos clusters. Além disso, observam-se dois agrupamentos bem definidos. Um grupo em que os autores estão atrelados, de forma direta ou indireta, a Srinivasan, R., e outro agrupamento menor, atrelado a Silva, M. (Figura 15).

O agrupamento de clusters, com ligações entre si, revela uma forte associação entre autores e instituições, formando uma rede de colaboração voltada ao avanço da ciência e do conhecimento, todavia, com diferentes fases de maturidade científica. Nos agrupamentos mais abrangentes, concentram-se também os autores com publicações mais antigas, o que indica experiência acumulada pelo grupo na área. O SWAT é um modelo complexo que requer diversos dados de entrada para sua calibração e simulação, e há escassez de materiais que ofereçam um guia passo a passo para seu uso. Nesse contexto, as redes de colaboração e a interação entre os autores tornam-se canais importantes para a disseminação do conhecimento prático acumulado ao longo do tempo. Assim como os clusters menores indicam o surgimento de novos grupos de pesquisa interessados na modelagem com SWAT aplicada aos recursos hídricos.

Ainda nesse contexto, o autor Karim C. Abbaspour (Abbaspour, K), afiliado à Universidade de Semnan (Irã), faz parte do cluster vermelho, sendo um dos desenvolvedores do SWAT-CUP e, apesar de ser coautor de apenas dois artigos e de seu nome não ser um dos grandes destaques na rede de colaboração (Figura 15), seus trabalhos são citados como referência bibliográfica em mais de 70% dos artigos avaliados.

Figura 15. Rede de colaboração entre autores que tenham pelo menos duas colaborações entre si. As linhas representam as ligações de colaboração entre os autores, e os círculos indicam o número de artigos em que cada autor está presente e sua importância nas redes de colaboração.



De acordo com a rede de colaboração entre as instituições, destaca-se a Texas A&M University, que, apesar de não liderar o número de artigos em que está presente, demonstra uma ampla rede de conexões colaborativas, o que se evidencia pelo tamanho expressivo de seu nó na visualização de redes de colaboração (Figura 16). Além disso, a rede de colaboração da Texas A&M University reflete a dinâmica de colaboração e cooperação interinstitucionais entre os pesquisadores responsáveis pelo desenvolvimento global do modelo SWAT e a comunidade científica brasileira.

O maior número de colaborações da Texas A&M University foi com a Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) (Figura 16), com participação de seus pesquisadores em 6 artigos. A colaboração recorrente sugere a existência de projetos de pesquisa colaborativos entre as duas instituições e de intercâmbio de conhecimento e de pesquisadores. Entre os projetos de pesquisa desenvolvidos colaborativamente está o Sistema de Unidade de Resposta Hidrológica para Pernambuco (SUPeR), um sistema interativo de modelagem hidrológica e de qualidade da água baseado no SWAT, que fornece uma interface na web, mapas, dados de entrada pré-carregados e resultados que incluem tabelas, gráficos e dados de saída.

Além da UFPE, observa-se no cluster da Texas A&M University o protagonismo de instituições localizadas na região Nordeste do Brasil, de modo que no agrupamento estão presentes a Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), a Universidade Federal da Paraíba (UFPB), e a Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), as quais têm colaboração com a Texas A&M University, mas também entre si (Figura 16), evidenciando a

presença de redes de pesquisa regionais/locais e um polo relevante frente a produção científica voltada para o uso do SWAT no Brasil.

Figura 16. Rede de colaboração entre as 18 principais instituições que tenham pelo menos uma colaboração. As linhas representam as ligações de colaboração entre os autores, e os círculos indicam o número de artigos em que cada instituição está presente e sua importância nas redes de colaboração.



A Universidade de São Paulo (USP) também se destaca por publicar o maior número de artigos sobre o uso do modelo SWAT no Brasil, com 18 (Tabela 4). Além de sua produtividade científica, a USP se sobressai pela ampla rede de colaborações, tanto no próprio cluster quanto com outros clusters (Figura 16). No total, a instituição mantém colaborações com 31 instituições, das quais 10 são estrangeiras, o que evidencia sua inserção em redes nacionais e internacionais de pesquisa.

A Universidade Federal de Lavras (UFLA) ocupa a terceira posição em número de participações nos artigos analisados, estando presente em 14 artigos (Tabela 4), dos quais três têm autoria exclusiva de pesquisadores vinculados à instituição, o que resulta em uma rede de colaboração mais restrita, totalizando 11 instituições parceiras, sendo quatro delas estrangeiras. Algo semelhante ocorre com a Universidade Federal de Viçosa (UFV), que está presente em nove artigos (Tabela 4), dos quais quatro são de autores vinculados apenas à UFV. A colaboração nos demais artigos ocorre com mais oito instituições, das quais duas são estrangeiras.

As universidades federais brasileiras se destacam significativamente na produção científica analisada (Tabela 4), o que se deve, em parte, à própria delimitação da pesquisa, voltada à identificação do uso do modelo SWAT no território nacional. No entanto, esse destaque também evidencia que a maior parte da produção científica no Brasil está concentrada em instituições públicas de ensino superior. Apesar disso, observa-se a ausência de instituições

localizadas nas regiões Norte e Centro-Oeste entre as mais produtivas, o que evidencia uma lacuna na participação dessas regiões na construção do conhecimento em modelagem hidrológica com o SWAT. Essa ausência pode indicar desafios institucionais, limitações de infraestrutura ou menor inserção em redes de colaboração científica voltadas a essa temática.

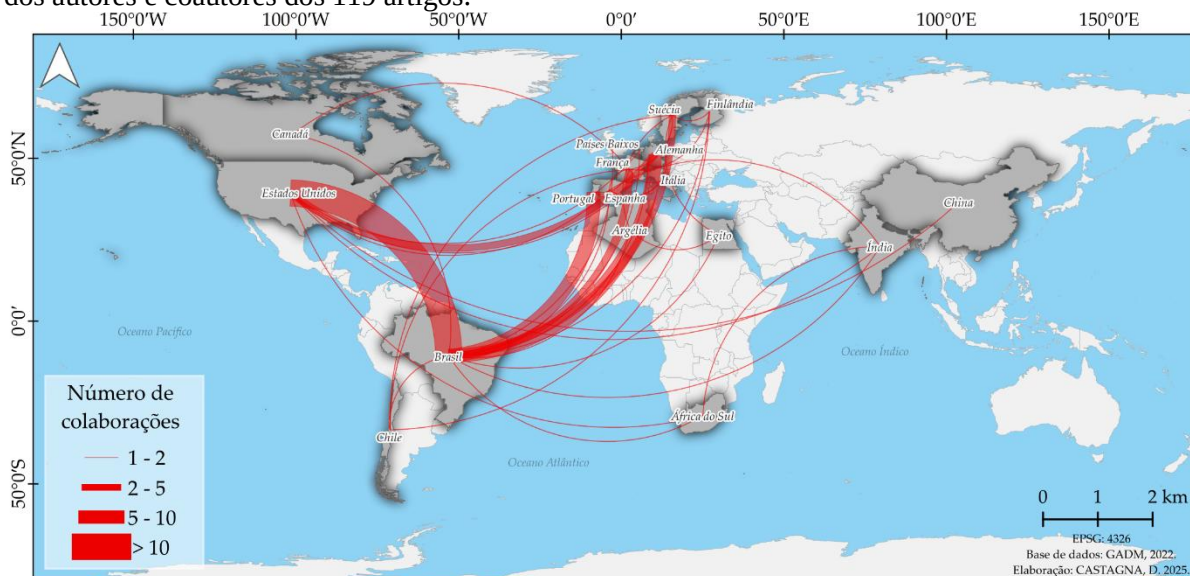
Tabela 4. Número de artigos das 18 principais instituições que tenham ao menos uma colaboração, apresentados na Figura 16.

Afiliações	Artigos	Afiliações	Artigos
University of São Paulo	18	Federal University of Minas Gerais	6
Texas A&M University	17	Federal Rural University of Pernambuco	5
Federal University of Lavras	14	University of Trás-os-Montes And Alto Douro	5
Federal University of Paraíba	14	Federal University of Santa Maria	5
Federal University of Viçosa	9	Federal University of Espírito Santo	4
Federal University of Campina Grande	9	Federal Technological University of Paraná	4
Federal University of Pernambuco	8	The Nature Conservancy	3
University of Lisboa	7	University of Brasília	3
Paulista State University "Júlio De Mesquita Filho"	7	College of Agriculture "Luiz de Queiroz"	3

Como mencionado, os resultados revelam a presença de instituições internacionais na produção científica sobre o modelo SWAT aplicado no Brasil. Sendo a Texas A&M University (Estados Unidos) a principal representante, entre as instituições com maior número de colaborações também é possível identificar duas de origem portuguesa: a University of Lisboa, com 7 artigos, e a University of Trás-os-Montes e Alto Douro, com 5 artigos. Além das universidades, observa-se a participação da organização não governamental (ONG) The Nature Conservancy, presente em três artigos (Tabela 4).

Além das instituições estrangeiras presentes na Tabela 4, a análise dos resultados apontou um total de 45 instituições, pertencentes a 18 nacionalidades distintas. Os Estados Unidos da América têm o maior número de colaborações (27), justamente por serem o local onde a Texas A&M University está localizada. Em seguida, destacam-se a Alemanha e Portugal, com sete colaborações cada (Figura 17).

Figura 17. Rede de fluxo de colaboração entre países, de acordo com a nacionalidade das instituições dos autores e coautores dos 119 artigos.



Embora a maioria das colaborações internacionais ocorra em parceria com instituições brasileiras, identificaram-se quatro artigos produzidos exclusivamente por autores vinculados a instituições internacionais. É o caso, por exemplo, do artigo de Strauch; Volk (2013), cujos autores são afiliados a instituições na Alemanha, mas a área de estudo está situada em Brasília. Outro exemplo é o trabalho de Xie; Ringler (2017), no qual ambos os autores são filiados ao International Food Policy Research Institute, localizado nos EUA, e a área de estudo é global.

No artigo de Fisher et al. (2018), composto por cinco autores — quatro deles afiliados a instituições estadunidenses —, a área de estudo localiza-se no estado de Santa Catarina. Em Gassman; Yingkuan (2015), uma revisão de artigos que utilizam o SWAT, Gassman está associado a uma instituição estadunidense e Wang a uma instituição chinesa. Por fim, em Lucas-Borja et al. (2020), os seis autores são vinculados a instituições da Espanha, Itália, Portugal e França, embora a área de estudo abordada no artigo esteja localizada no estado de São Paulo.

Ao analisar as colaborações internacionais, também é possível identificar um predomínio de parcerias com instituições de países do Norte Global, especialmente na América do Norte e na Europa Ocidental. O que indica uma tendência de intercâmbio científico mais intenso com países historicamente consolidados em infraestrutura acadêmica e tecnológica. Em contraste, as colaborações com países da América do Sul são praticamente inexistentes, identificando-se apenas uma parceria com o Chile, o que aponta para a falta de cooperação regional. Contudo, o fortalecimento de redes regionais pode ser significativo, pois

compartilham desafios ambientais e contextos socioeconômicos semelhantes no uso e na gestão de recursos hídricos (Figura 17).

3.4. Discussão

3.4.1. Distribuição da produção científica sobre uso do modelo SWAT no Brasil

Devido à natureza específica do modelo SWAT, cuja aplicação é voltada a bacias hidrográficas (BH), as áreas de trabalho dos artigos analisados referem-se a essas unidades hidrográficas. Adicionalmente, dois trabalhos adotaram como recorte espacial os reservatórios de usinas hidrelétricas e suas respectivas áreas a montante. É o caso de Dias et al. (2018), que modelaram o reservatório da UHE Furnas e a área a montante influenciada por sua operação. Assim como Luz et al. (2016), em que a área de trabalho é o reservatório e a montante da UHE de Itumbiara.

Ao distribuir as áreas de trabalho dos artigos avaliados entre as 12 regiões hidrográficas brasileiras, que são bacias hidrográficas agrupadas de acordo com características naturais, econômicas e sociais semelhantes, observa-se uma distribuição desigual dos artigos ao longo do território nacional e das regiões hidrográficas, com concentração em regiões específicas.

A região hidrográfica do Paraná concentra o maior número de artigos (37), seguida pela do São Francisco (19) (Tabela 5). No entanto, nessas regiões hidrográficas, observa-se o agrupamento de artigos em áreas específicas, como no nordeste do estado de São Paulo (SP) e no centro-sul de Minas Gerais (Figura 18). Os maiores números de artigos nessas regiões podem estar principalmente ligados a importantes centros acadêmicos, como universidades e institutos de pesquisa bem estabelecidos, mas também ao fato dos corpos hídricos dessas regiões desempenharem papel estratégico na geração de energia, na produção agrícola e no abastecimento público.

As regiões hidrográficas Uruguai, Atlântico Leste, Atlântico Sul, Amazônia, Atlântico Nordeste Ocidental e Parnaíba apresentam menos de 10 artigos em que as áreas de estudo se situam dentro de seus limites (Tabela 5). Destaca-se que, nas duas últimas regiões citadas, não foi identificado nenhum artigo. Em especial, a região hidrográfica da Amazônia, embora haja cinco estudos localizados em seus limites, apresenta esse número proporcionalmente reduzido, considerando sua extensa área territorial e sua relevância estratégica para questões ambientais, de abastecimento populacional e agrícola, bem como para a produção de energia. Ressalta-se, ainda, que os estados de Roraima, Amapá, Amazonas, Acre e Rondônia, integrantes da região,

não apresentam registros de publicações analisadas sobre suas bacias hidrográficas, apesar da reconhecida importância ecológica e hidrológica dessas áreas (Figura 18).

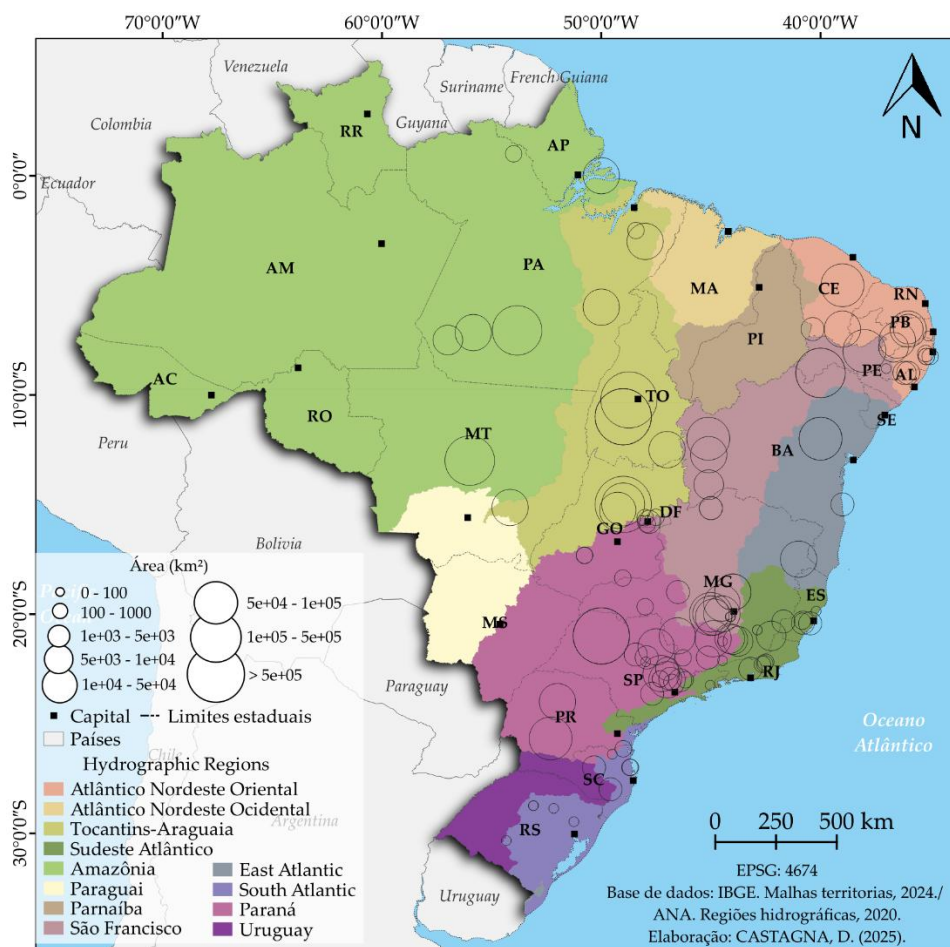
Tabela 5. Relação entre as regiões hidrográficas brasileiras e o número de artigos com área de trabalho dentro de seus limites.

Regiões hidrográficas	Artigos	Regiões hidrográficas	Artigos
Amazônica	5	Paraguai	1*
Atlântico Leste	4	Paraná	37
Atlântico Nordeste Ocidental	0	Parnaíba	0
Atlântico Nordeste Oriental	14	São Francisco	19
Atlântico Sudeste	13	Tocantins-Araguaia	12
Atlântico Sul	7	Uruguai	2

*O artigo localizado na região hidrográfica do Paraguai apresenta o valor da área de trabalho incorreto; por isso, não consta na Figura 18.

O SWAT permite o processamento de pequenas e grandes bacias hidrográficas, como se evidencia pelo tamanho das áreas de estudo dos artigos analisados, que variam de 0,38 a 900.480 km². Essa ampla faixa de aplicação é refletida na distribuição das áreas de trabalho modeladas nos artigos encontrados: 18 artigos utilizaram bacias com menos de 100 km²; 23 artigos abordaram áreas entre 100 e 1.000 km²; 21 estudos consideraram bacias entre 1.000 e 5.000 km²; 8 artigos trataram de áreas entre 5.000 e 10.000 km²; 24 estudos modelaram bacias entre 10.000 e 50.000 km²; 7 artigos abordaram áreas entre 50.000 e 100.000 km²; 4 estudos consideraram bacias entre 100.000 e 500.000 km²; e 8 artigos aplicaram o SWAT em áreas superiores a 500.000 km² (Figura 18).

Figura 18. Distribuição da localização das áreas de estudo dos artigos que utilizam a modelagem SWAT no Brasil.



Além dos artigos representados na Figura 18, Bressiani et al. (2015) apresentam uma revisão sistemática sobre o uso do SWAT no Brasil. Gassman; Yingkuan (2015) apresentam uma revisão de 10 artigos publicados em todo o mundo para avaliar o uso do SWAT, dos quais um é o de Bressiani et al. (2015).

Dois artigos realizam análises em escala global. Em Xie; Ringler (2017), os autores avaliam cenários e tendências de carga de nitrogênio e de potássio decorrentes das atividades agrícolas nos corpos d'água. Em Dhanesh et al. (2020), os autores avaliaram e compararam a eficiência dos dados de precipitação de estações meteorológicas, do CFSR e do CHIRPS na estimativa da vazão pelo SWAT, em bacias de diferentes zonas climáticas, entre elas as bacias hidrográficas do rio Chapecó e do rio Canoas.

O último artigo que não consta na Figura 18 é de Ferreira et al. (2024), que avalia possíveis alterações no regime hidrológico do bioma Pantanal, decorrentes de mudanças no uso e na cobertura da terra na parte alta da bacia hidrográfica do Alto Paraguai, em diferentes cenários de mudanças climáticas. Os autores afirmam que “A porção da bacia em estudo drena uma área de 32.407.994 km²”. No entanto, esse valor parece inconsistente, uma vez que outros

trabalhos (Broquet et al., 2024; Oliveira et al., 2025) indicam que a área da bacia do Alto Paraguai varia entre 360 e 370 mil km².

3.4.2. *Objetivos dos artigos*

Os resultados e usos proporcionados pelo SWAT são diversos, mas nos artigos encontrados que aplicam o modelo em localidades brasileiras, observa-se uma tendência quanto às finalidades e aplicações. Aproximadamente 48 artigos, o que representa cerca de 40% dos estudos, têm como objetivo avaliar o impacto do uso do solo sobre o regime hidrológico e/ou a produção de sedimentos. Essa predominância fica implícita na recorrência das palavras-chave land use, land use change, land cover, land cover change, deforestation, além dos termos sediment yield e streamflow, que se relacionam tanto às análises sobre uso do solo quanto aos estudos voltados a resultados hidrológicos básicos. Nessa mesma perspectiva, destacam-se também as palavras-chave water balance, surface runoff e runoff, associadas a resultados básicos obtidos em qualquer simulação com o SWAT, como balanço hídrico, regime hidrológico e vazão líquida, temática presente em 18 artigos (Figura 19).

Além de investigarem os impactos do uso do solo passado e presente e de elaborarem cenários futuros, nove artigos também incorporam cenários de mudanças climáticas. A temática das mudanças climáticas, associada à análise de cenários e de impactos no regime hidrológico, ainda é abordada em outros sete artigos. Objetivos associados às palavras-chave climate change, regional climate model e Eta-miroc5 (Figura 19). Essa última é um sistema de modelagem que inclui um modelo regional (Eta), desenvolvido pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), acoplado a um modelo global (MIROC5), que possui cenários alinhados aos relatórios do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC).

A presença expressiva de termos como calibration, validation, swat-cup, uncertainty analysis e sufi-2 (Figura 19) reflete a importância atribuída às etapas de calibração e validação do modelo, mas também é alvo de estudo em 17 dos artigos analisados. A calibração e a validação são etapas essenciais para garantir a confiabilidade das simulações. A calibração consiste no ajuste dos parâmetros do modelo para que os resultados se aproximem dos dados observados, enquanto a validação avalia o desempenho do modelo em períodos distintos, assegurando sua capacidade preditiva. Essas etapas geralmente são aferidas por meio de métricas estatísticas, a fim de confirmar que a representação dos processos hidrológicos seja realista.

Ainda no que tange a artigos com o objetivo de discutir calibração e validação, o artigo de Uzeika et al. (2012) avalia a eficiência do SWAT na simulação da vazão líquida e da

demonstrando vantagem por exigir menos dados para realizar as simulações. No entanto, o SWAT é mais indicado para simular processos mais complexos, como o transporte de sedimentos e nutrientes, bem como os impactos do manejo do solo. E, em Dos Santos; De Oliveira; Mauad (2020), os resultados do modelo SWAT para a vazão líquida na escala diária e para as cargas de sedimentos, nitrogênio e fósforo apresentam ligeira melhora em comparação com os do modelo GWLF. Em ambos os artigos, os autores ponderam se o aumento do desempenho do SWAT justificaria o esforço adicional necessário para sua calibração e execução.

As outras duas comparações com o modelo tratam do trabalho de Ferreira et al. (2021b) e Acosta et al. (2023), que compara o HEC-HMS, no qual se observa um desempenho superior do SWAT. Por outro lado, em Chen; Cataldi; Francisco (2023), na comparação com o SMAP, voltada à previsão de um evento extremo de cheia, mesmo observando que o SWAT permite análise mais abrangente das características da bacia hidrográfica, verificaram que o SMAP teve menor erro relativo na calibração e validação, e assim como em SCS-CN tem simplicidade operacional, e menor demanda de dados de entrada, fatores relevantes em bacias com baixo monitoramento hidrometeorológico.

Entre os artigos analisados, há também o de Strauch; Volk (2013), que propõe adaptações no módulo de crescimento vegetal do SWAT, motivadas pela percepção de que os módulos foram originalmente elaborados com base em informações de regiões dos Estados Unidos, predominantemente associadas a condições climáticas temperadas. Nesses casos, os autores buscam ajustar o módulo para que reflita mais fielmente as características dos ambientes tropicais, aumentando a representatividade e a precisão das simulações.

Uma lacuna significativa observada nos artigos analisados é a escassez de estudos sobre a modelagem da qualidade da água, embora a poluição por fontes difusas seja reconhecida como uma das principais áreas de pesquisa em hidrologia com o modelo SWAT, conforme destacado por Janjić; Tadić (2023), em uma revisão bibliográfica mundial. Essa carência corrobora as conclusões de Ferraz et al. (2025a), que apontam falta de pesquisas sobre o tema em bacias hidrográficas brasileiras. Dentre os artigos avaliados, apenas três dissertam sobre a presença de sólidos suspensos totais, nitrogênio total e fósforo total na água (De Mello et al., 2017; Lopes et al., 2022; Taffarello et al., 2018), mas em nenhum deles o objetivo principal é sobre a qualidade da água em si, dois verificam a relação entre o uso do solo e os parâmetros citados e o outro realiza a calibração e validação desses parâmetros.

Verifica-se também a ausência de artigos que visem, detalhem e modelem áreas urbanas. O SWAT dispõe, no módulo de uso do solo, de parâmetros para representar áreas urbanas, mas

nenhum dos artigos encontrados explorou especificamente a modelagem de bacias hidrográficas urbanas. A ausência de estudos focados nesse tema sugere oportunidade para pesquisas futuras que avaliem a aplicabilidade do SWAT em contextos urbanos puros, especialmente em cidades brasileiras, onde a carência de modelagens hidrológicas urbanas detalhadas é evidente.

3.4.3. Bases de dados de entrada

A complexidade inerente às bacias hidrográficas, com suas inúmeras variáveis inter-relacionadas, é a razão pela qual o modelo SWAT exige uma gama de dados de entrada, o que leva pesquisadores a optar por modelos simplificados (Dos Santos; De Oliveira; Mauad, 2018; Ferreira et al., 2021c; Chen; Cataldi; Francisco, 2023).

Diante dessa exigência, ao avaliar os dados de entrada dos artigos encontrados, verifica-se uma grande variação nesses dados. Considerando os dados espaciais, espera-se que pequenas bacias ($< 2,5 \text{ km}^2$; Tucci, 2012) utilizem dados de alta resolução espacial, pois capturam detalhes necessários para uma representação precisa dos processos hidrológicos. Por outro lado, em bacias grandes ($> 1.000 \text{ km}^2$; Tucci, 2012), a adoção de resoluções mais baixas é uma prática frequente, motivada tanto pelas limitações de capacidade computacional quanto pela própria escala de análise, em que um nível excessivo de detalhe pode tornar-se desnecessário.

Os dados utilizados nos artigos encontrados não seguem essa lógica, de modo a encontrar, por exemplo, artigos em que a área de trabalho é superior a 600.000 km^2 e utiliza modelo digital de elevação (MDE) com resolução espacial de 30 m; em contrapartida, há artigos com área de trabalho inferior a 200 km^2 que utilizam MDE com resolução espacial de 90 m. Por outro lado, identificou-se um padrão de repetição nas fontes de dados utilizadas por um mesmo autor ou por grupos de pesquisa em diferentes estudos. Esse fato pode ser explicado pela expertise desenvolvida no emprego de um determinado conjunto de dados ou pela recorrência da área de estudo, ligada à continuidade de seus estudos, ainda que com objetivos de pesquisa distintos, o que também ocorrerá com os dados de uso e cobertura do solo (Figura 20).

Figura 20. Exemplos de repetição no uso de dados de modelo digital de elevação (MDE) e do uso do solo por autores/artigos (1 artigo que apresenta dois valores para a área da BH se deve ao fato de que o artigo avaliou duas BHs).

MDE	Artigos (autores)	Área da BH (km ²) ¹	Uso do Solo
SRTM 30m	SERRÃO et al. (2019)	42.000	TerraClass
	SERRÃO et al. (2020)	764.000	MapBiomias
	SERRÃO et al. (2021)	764.000	
	SERRÃO et al. (2022)	42.000	
	VIANA et al. (2019)	600	Landsat 5
	VIANA et al. (2021)	600	
	VIANA et al. (2023)	600	MapBiomias
ASTER 30m	AMORIM et al. (2020)	764.000	IBGE
	AMORIM et al. (2022)	51.238	
	HERNANDES et al. (2018a)	698 e 805	Landsat* e MODIS
	HERNANDES et al. (2018b)	698 e 805	
	DE OLIVEIRA et al. (2018)	15.409	Landsat 8
	DE OLIVEIRA et al. (2019)	3.754	
	RODRIGUES et al. (2015)	12.300	Landsat 5
SRTM 90m	ABOU et al. (2019)	900.480	Referências bibliográficas
	ABOU et al. (2021)	900.480	
	ABOU et al. (2022)	900.480	
	MONTEIRO et al. (2016a)	6.500	
	MONTEIRO et al. (2016b)	767.000	GLCC - USGS 1km
ALOS PALSAR	SILVA et al. (2023)	0,53 e 1	Landsat 8
	SILVA et al. (2024)	1,48	
	JUNQUEIRA et al. (2022a)	3.220	IBGE
	JUNQUEIRA et al. (2022b)	3.220	
	PISSARRA et al. (2022)	13.515	MapBiomias
	COSTA et al. (2023)	13.515	
	COSTA et al. (2024)	2.050	
	PEREIRA et al. (2024)	32,6	

* Os autores não especificam qual missão foi utilizada.

Considerando os MDEs utilizados em 10 ou mais artigos, o mais utilizado foi o Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), na resolução de 30 metros, presente em 36 estudos. O ASTER, que também possui resolução de 30 m, foi utilizado em 14 artigos, seguido pela versão de 90 m do SRTM, com 11 ocorrências. Por fim, o ALOS PALSAR (12,5 m de resolução) e os dados do IBGE foram utilizados em 10 artigos.

Paralelamente a esses modelos de abrangência global ou nacional, parte dos artigos analisados incorpora MDEs de caráter local. Desenvolvidos por agências estaduais, oferecem níveis de detalhamento espacial personalizados às particularidades de cada área de investigação. Assim como no trabalho de Dhanesh et al. (2020), que compara os dados CHIRPS e CFSR em dez bacias hidrográficas distribuídas globalmente, incluindo as bacias dos rios Chapecó e

Canoas, localizados no estado de Santa Catarina, e que utilizam o MDE disponibilizado pela Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (Epagri).

Dentre outros exemplos de uso de dados locais estão os trabalhos de (Dill; Dagios; Barros, 2022), que também utilizaram dados da Epagri, e de (De Mello et al., 2017), que empregaram o modelo da Coordenação de Planejamento Ambiental do Estado de São Paulo. (Strauch et al., 2013) e (Strauch; Volk, 2013) basearam-se em um MDE derivado de mapas topográficos planialtimétricos digitais do Distrito Federal (escala 1:10.000), disponibilizados pela Companhia de Planejamento do Distrito Federal (Codeplan). E, ainda, Rabelo et al. (2021) utilizaram o MDE da Fundação de Meteorologia e Recursos Hídricos do Estado do Ceará (FUNCEME).

Há outros MDEs utilizados nos artigos, mas chama a atenção que, apesar de o MDE ser considerado primordial e indispensável para a modelagem de bacias hidrográficas no SWAT, 15 artigos não citam ou não deixam claro qual MDE foi utilizado.

Os dados de uso e cobertura do solo podem ser classificados como primários ou secundários. Os dados primários, utilizados em 47 artigos, são provenientes da classificação realizada pelos próprios autores com base em imagens de satélite ou em levantamentos de campo. Desses, 38 utilizaram sensores a bordo de satélites da missão Landsat, que têm resolução de 30 m nas bandas multiespectrais e de 15 m na pancromática, considerada de resolução média, empregados em modelagens de bacias hidrográficas de 0,54 a 110,446 km². Além do Landsat, seis artigos utilizam satélites de alta resolução espacial: RapidEye (5,0 m) (Rodrigues; Jacobi; Figueira, 2019), QuickBird (2,44 m) (Pinto et al., 2013), Pleiades (2,0 m) (Fisher et al., 2018; Pereira et al., 2024), WorldView-2 (0,46 m) (Fisher et al., 2018), GeoEye (1,65 m) (Martins et al., 2021) e IKONOS (1,0 m) (Rocha et al., 2012). Em dois artigos, a classificação do uso e da cobertura do solo foi realizada exclusivamente por meio de levantamento de campo (Uzeika et al., 2012; Bonumá et al., 2014). Essa abordagem foi viável devido às áreas de estudo reduzidas, de 1,19 km² e 4,80 km².

Os dados secundários consistem em bases de uso e de cobertura do solo previamente classificadas e disponibilizadas por terceiros. Por exemplo, a base do MapBiomas, projeto brasileiro multi-institucional com resolução espacial de 30 m, foi utilizada em 22 artigos, com adoção registrada a partir de 2020. Este marco temporal relaciona-se à consolidação do projeto, cuja primeira coleção foi lançada em 2016. O período de quatro anos pode ter permitido a validação e consolidação dos dados, estabelecendo a confiabilidade necessária para sua adoção pela comunidade científica.

Outros dados secundários nacionais também foram empregados, como o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) aplicado em seis artigos (Amorim et al., 2020, 2022; Junqueira et al., 2022a, 2022b), o TerraClass que foi utilizado em três artigos (Dos Santos et al., 2018; Silva et al., 2018; Serrão et al., 2019), além de bases de dados com recorte regional ou local, como por exemplo a base do FUNCEME (Siqueira et al., 2021) e do Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Espírito Santo (Fukunaga et al., 2015; Moreira; Schwambach; Rigo, 2018; Cecílio; Pimentel; Zanetti, 2019). Cabe ressaltar que 15 artigos basearam suas classificações de uso do solo em trabalhos anteriores, utilizando-os como referência bibliográfica. E, ainda, observa-se que sete trabalhos não especificam a fonte dos dados de uso e de cobertura do solo utilizados.

O SWAT também exige a classificação dos tipos de solo específicos da bacia hidrográfica. A caracterização pedológica nos artigos analisados é predominantemente baseada em bancos de dados de instituições nacionais; apenas três artigos (Monteiro et al., 2015, 2016; Xie; Ringler, 2017) utilizam dados globais de solos produzidos pela Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO), uma instituição internacional.

Dentre as 119 publicações, a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) consolida-se como a fonte de dados de solo mais frequente, com presença em 47 artigos. Considerando ainda as instituições nacionais, os dados pedológicos do IBGE são utilizados em 10 artigos; vale, no entanto, ressaltar que esses dados são fundamentados no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), desenvolvido e mantido pela Embrapa. Cabe destacar que os levantamentos pedológicos históricos do IBGE, iniciados em 1980, tiveram como principal insumo os dados gerados pelo Projeto RADAMBRASIL. Esta herança pedológica ainda se faz presente, sendo que dois artigos (Fukunaga et al., 2015; Luz et al., 2016) citam a utilização direta de dados pedológicos do RADAM.

Além de dados de instituições nacionais, 28 artigos utilizam dados pedológicos de instituições regionais e locais já citados como a FUNCEME e Epagri, no entanto, outras instituições também foram utilizadas, como o banco de dados do Departamento de Solos do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Viçosa, elaborado para o estado de Minas Gerais, foi aplicado em cinco artigos (Almeida; Pereira; Pinto, 2018; Pissarra et al., 2022; Costa et al., 2023, 2024; Pereira et al., 2024), dos quais quatro tem repetição de seis autores e coautores, apontando possível grupo de pesquisa.

Complementarmente a essas fontes institucionais, observa-se que 12 artigos basearam a caracterização pedológica em trabalhos previamente publicados, utilizados como referências

bibliográficas. Por outro lado, em 12 publicações não há menção à procedência das informações sobre a espacialização dos tipos de solo.

Além da classificação dos tipos de solo, o SWAT exige diversos parâmetros do solo, como a profundidade, a granulometria e a condutividade hidráulica, entre outros. Para obter tais características, o modelista pode optar por utilizar a base de dados original do SWAT - baseada no Soil Survey Geographic Database (SSURGO) e no State Soil Geographic Database (STATSGO), ou construir sua própria base de dados (USERsoil). Considerando os artigos analisados, 42 utilizaram dados de referências bibliográficas, cinco empregaram funções de pedotransferência, quatro utilizaram dados disponibilizados pela Embrapa, três recorreram a informações da FAO, três mencionaram o RADAM e 52 artigos não citaram a proveniência dessas informações.

Para a modelagem no SWAT, também é necessária uma base de dados climáticos para simular os processos hidrológicos. O modelo necessita de dados diários de precipitação, temperatura (máxima e mínima), radiação solar, umidade relativa e velocidade do vento. Esses dados podem ser obtidos de estações meteorológicas, de fontes de reanálise e de satélites.

Dentre os estudos analisados, verificou-se que 61 artigos, o que corresponde a mais de 50% da amostra, mencionaram a utilização de dados de estações meteorológicas disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). A segunda instituição mais citada foi a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), cujos dados foram utilizados em 51 estudos. Ressalta-se, contudo, que a ANA disponibiliza predominantemente dados de precipitação, o que exigiu a complementação com outras fontes para os demais parâmetros climáticos necessários ao SWAT, incluindo, em várias situações, o próprio INMET. No que se refere às bases de dados de satélite e de reanálise, 8 artigos mencionaram o emprego do TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) para estimativas de precipitação, enquanto 16 citaram o CFSR (Climate Forecast System Reanalysis) como fonte principal de variáveis meteorológicas. Outras instituições regionais, como EPAGRI, IAC, INCAPER, DAEE e ESALQ, também foram citadas em menor escala. Cabe destacar que, assim como observado para os dados citados anteriormente, 10 artigos não indicam a procedência das informações climáticas utilizadas.

Os dados climáticos influenciam e caracterizam muitas interações na modelagem de bacias hidrográficas no SWAT, especialmente na evapotranspiração. O modelo oferece três métodos para estimar a evapotranspiração de referência (ET_0): Penman-Monteith, Priestley-Taylor e Hargreaves. A seleção do método define como os dados climáticos serão utilizados internamente no cálculo da ET_0 , embora também seja possível inserir valores pré-calculados ou

provenientes de fontes externas, como produtos de reanálise. Na análise dos documentos revisados, constatou-se que o método de Penman-Monteith foi o mais adotado, tendo sido aplicado em 34 artigos, embora exija um conjunto mais abrangente de parâmetros meteorológicos (Tabela 6). Adicionalmente, três artigos aplicam mais de um método de estimativa de ET_0 : Silva et al. (2023) aplicam Penman-Monteith e Priestley-Taylor em bacias distintas; Ferraz et al. (2023) empregam Penman-Monteith e Hargreaves em períodos distintos; e Ferreira et al. (2021b) tiveram como objetivo avaliar o potencial do SWAT para estimar ET_0 em uma bacia hidrográfica do Cerrado. E 64 artigos não citam qual modelo ou qual base de dados foi utilizado para estimar a ET_0 (Tabela 6).

Tabela 6. Métodos de evapotranspiração utilizados nos artigos encontrados.

Método de evapotranspiração	Nº de artigos
Penman-Monteith	34
Priestley-Taylor	3
Hargreaves	6
Penman-Monteith e Hargreaves	1
Penman-Monteith e Priestley-Taylor	1
Penman-Monteith, Priestley-Taylor and Hargreaves	1
ASEBAL	1
Metric	1
MODIS	3
Referência bibliográfica	1
Tanque Classe A	1
Não cita	64

Apesar de ser possível calcular a ET_0 fora do SWAT e adicioná-la ao modelo para, então, realizar a simulação, nenhum dos artigos encontrados o fez. Trabalhos como o de Franco et al. (2020) (Franco; Oliveira; Bonumá, 2020) citam o uso do modelo Evapotranspiration at High Resolution with Internalized Calibration (METRIC), com base em raster MODIS, e utilizam esse dado na calibração da simulação. Outro modelo utilizado na calibração da ET_0 foi o Automated Surface Energy Balance Algorithm for Land (ASEBAL), que também se baseou no raster do MODIS (Da Silva et al., 2024). E três artigos utilizaram o produto MOD16A2 do MODIS (Strauch; Volk, 2013; Acosta et al., 2023; Lins et al., 2024), que se baseia no modelo Penman-Monteith.

As variáveis climáticas condicionam a extensão dos períodos de aquecimento, calibração e validação da simulação hidrológica, uma vez que a amplitude das séries históricas disponíveis determina as possibilidades de modelagem. Entre os artigos avaliados, a abrangência temporal variou de alguns dias a 51 anos. Observou-se que 69 estudos utilizaram séries superiores a 10 anos; entretanto, apenas 13 artigos adotaram períodos iguais ou superiores

a 30 anos, intervalo que caracteriza um clima normal e assegura a representatividade estatística necessária para estudos climáticos.

A distribuição geográfica desses 13 estudos de longa duração revela a disparidade regional na disponibilidade de dados climáticos, em que oito artigos concentram-se nas regiões Sul e Sudeste, enquanto o Centro-Oeste é representado por apenas um artigo, em Brasília, e o Nordeste por três publicações. Apenas um artigo foi identificado na região Norte, especificamente no estado do Pará, o que evidencia a escassez de séries históricas robustas na região amazônica. Adicionalmente, identificou-se uma lacuna metodológica em 45 publicações, que omitiram o tempo empregado em ao menos uma das etapas fundamentais do processo (aquecimento, calibração ou validação).

3.4.4. Limitações e proposições

A principal limitação na avaliação dos artigos refere-se às bases de dados de entrada. Verificam-se discrepâncias nas possibilidades de dados de entrada, especialmente em função do tamanho da bacia hidrográfica modelada e das resoluções dos inputs utilizados pelos autores.

Outro obstáculo crítico é a falta de transparência e clareza quanto aos dados utilizados e ao acesso aos inputs construídos pelos autores, como, por exemplo, os parâmetros de caracterização dos solos elaborados por meio de equações de pedotransferência. Em consonância com o princípio da replicabilidade científica, esses dados deveriam ser claros e/ou publicamente disponíveis em sites ou repositórios, especialmente quando oriundos de projetos de pesquisa financiados com recursos públicos. No entanto, dos 117 artigos passíveis de replicação da modelagem (excluindo duas revisões), apenas 32 disponibilizam material suplementar. Desses, apenas dez forneciam dados suficientes para uma replicação integral. Ademais, quatro artigos mencionaram a disponibilidade dos dados mediante solicitação.

É consenso que o modelo SWAT é complexo e requer um grande número de variáveis. Apesar disso e do conhecido desafio da escassez ou dispersão de dados no Brasil, especialmente de parâmetros do solo e de informações climáticas, apenas sete artigos identificaram explicitamente a falta de dados como um empecilho à modelagem. Por fim, uma terceira limitação identificada refere-se ao período temporal adotado para o aquecimento, a calibração e a validação do modelo. Essas etapas estão intrinsecamente relacionadas à disponibilidade de séries climáticas de longo prazo, sendo 30 anos o período ideal. Contudo, apenas 13 artigos utilizaram séries climáticas para análise de três ou mais décadas.

Como proposta para superar as limitações anteriormente citadas, recomenda-se que os estudos priorizem análises mais aprofundadas da qualidade e da adequação dos dados de

entrada, assegurando que as bases selecionadas sejam representativas da escala e das condições específicas da bacia hidrográfica modelada. Paralelamente, é essencial que os autores disponibilizem integralmente seus conjuntos de dados, prática que deve ser incentivada de forma mais incisiva pelas revistas científicas nacionais e internacionais por meio de políticas editoriais claras.

Destaca-se que o SWAT conta com bases de dados internas, especialmente para os parâmetros do solo e de uso e cobertura da terra, construídas com base em condições ambientais típicas dos Estados Unidos. Nesse contexto, nota-se a carência de estudos que avaliem sistematicamente o impacto da adaptação desses parâmetros às condições tropicais e regionais do Brasil. Considerando a dimensão continental e a variabilidade climática e pedológica do território brasileiro, torna-se fundamental investigar se ajustes nesses inputs resultam em diferenças significativas na performance do modelo.

De modo complementar, também são escassos os trabalhos que testem o comportamento do gerador climático do SWAT (WXGEN) no preenchimento de falhas em séries meteorológicas sob condições tropicais. Avaliar a precisão desse módulo frente a dados climáticos típicos de regiões como o Brasil é crucial para assegurar a confiabilidade das simulações em contextos em que a disponibilidade de dados observados é limitada.

3.4.5. Artigos publicados de outubro de 2024 e dezembro de 2025

O levantamento bibliográfico referente ao período de outubro de 2024 a dezembro de 2025 totalizou 15 publicações, sendo 5 em 2024 e 10 em 2025. A distribuição temática revelou convergência com o que foi encontrado até outubro de 2024. Predominaram as investigações sobre cenários de mudança climática, com quatro artigos avaliando os impactos sobre os componentes do balanço hídrico. A dinâmica de uso e ocupação do solo figurou como o segundo tema mais relevante (quatro artigos), seguido por artigos com o objetivo de calibração e validação em bacias hidrográficas (dois artigos).

A distribuição espacial das áreas de estudo desses artigos também reforça a acentuada disparidade geográfica na produção científica analisada. Observa-se a concentração predominante nas regiões Sul e Sudeste, que somam sete publicações, padrão que se repete na região Nordeste com igual número de artigos. Em contrapartida, nota-se a lacuna em outras regiões do país: apenas um trabalho foi identificado na região Norte, especificamente no estado do Pará, e na região Centro-Oeste não há nenhum artigo.

3.5. Conclusão

A análise da produção científica revela um crescimento significativo na aplicação do modelo SWAT no Brasil, caracterizado por uma forte colaboração internacional, com destaque para a Texas A&M University (EUA). Essa parceria estratégica deve-se ao fato da instituição ser o centro de desenvolvimento do modelo, o que atrai pesquisadores brasileiros em busca de transferência tecnológica e de aprimoramento da capacitação técnica. O intercâmbio direto no núcleo de concepção da ferramenta não apenas acelera a curva de aprendizado, mas também consolida os grupos de pesquisa nacionais. Como resultado, há o fortalecimento da produção científica brasileira e o avanço da autonomia do país no domínio de metodologias avançadas de modelagem hidrológica.

Observa-se também a falta de integração regional com os países da América do Sul, o que limita o potencial de cooperação para enfrentar desafios hidrológicos comuns. A internacionalização regional seria estratégica para o desenvolvimento de bases de dados unificadas e de parametrizações regionais mais precisas, fortalecendo a governança dos recursos hídricos diante das similaridades climáticas e socioeconômicas do continente.

Geograficamente, os estudos concentram-se predominantemente nas regiões hidrográficas do Paraná e do São Francisco, no Sudeste do país, enquanto outras regiões de relevância crítica, como a Amazônia, permanecem subestudadas. Tematicamente, há um claro predomínio de pesquisas que avaliam os impactos do uso do solo na hidrologia e na produção de sedimentos. Essa tendência evidencia lacunas, como, por exemplo, nas áreas de modelagem da qualidade da água e da aplicação do modelo em bacias hidrográficas urbanas.

A ampliação desse escopo temático, contudo, esbarra na complexidade do modelo SWAT e dos softwares utilizados no processamento. O SWAT exige o gerenciamento de um vasto volume de dados de entrada, incluindo séries temporais climáticas e parâmetros espaciais detalhados de solo, relevo e uso da terra. Essa densidade algorítmica impõe ao pesquisador desafios que transcendem o domínio operacional do software, exigem competência no pré-processamento de múltiplos formatos de dados e, fundamentalmente, a compreensão profunda dos processos hidrológicos e biofísicos que regem as sub-bacias. Tal embasamento teórico é indispensável para a interpretação fidedigna dos resultados e para garantir a acurácia na parametrização e na calibração do modelo.

Em síntese, o Brasil apresenta um terreno extremamente fértil para a modelagem hidrológica, dada sua dimensão continental e a diversidade de seus biomas, solos e climas. No entanto, diante dessa mesma complexidade, fica evidente que a aplicação do SWAT ainda está

em fase de amadurecimento. Um dos maiores desafios reside no aprofundamento do conhecimento sobre as bases de entrada do modelo, que precisam ser melhor caracterizadas e validadas para as condições específicas do território nacional. Esse esforço é fundamental para consolidar uma modelagem hidrológica de precisão no país.

3.6. Referências bibliográficas

ABBASPOUR, K. C. *et al.* Global soil, landuse, evapotranspiration, historical and future weather databases for SWAT Applications. **Scientific Data**, v. 6, n. 1, p. 263, 6 nov. 2019. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41597-019-0282-4>. Acesso em: 15 maio 2024.

ABOU RAFEE, Sameh A. *et al.* Large-Scale Hydrological Modelling of the Upper Paraná River Basin. **Water**, v. 11, n. 5, p. 882, abr. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w11050882>. Acesso em: 12 abr. 2024.

ACOSTA, Eileen Andrea *et al.* Biophysical Benefits Simulation Modeling Framework for Investments in Nature-Based Solutions in São Paulo, Brazil Water Supply System. **Water**, v. 15, n. 4, p. 681, fev. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w15040681>. Acesso em: 10 maio 2024.

AKOKO, George *et al.* A Review of SWAT Model Application in Africa. **Water**, v. 13, n. 9, p. 1313, jan. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w13091313>. Acesso em: 02 ago. 2024.

ALMEIDA, Rafael A.; PEREIRA, Silvio B.; PINTO, Daniel B. F. Calibration and validation of the SWAT hydrological model for the Mucuri river basin. **Engenharia Agrícola**, v. 38, n. 1, p. 55–63, jan. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v38n1p55-63/2018>. Acesso em: 15 set. 2024.

ALOUI, Sarra *et al.* A review of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) studies of Mediterranean catchments: Applications, feasibility, and future directions. **Journal of Environmental Management**, v. 326, p. 116799, 15 jan. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116799>. Acesso em: 10 maio 2024.

AMORIM, Jhones da S. *et al.* Evaluation of Satellite Precipitation Products for Hydrological Modeling in the Brazilian Cerrado Biome. **Water**, v. 12, n. 9, p. 2571, set. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w12092571>. Acesso em: 15 maio 2024.

AMORIM, Jhones da Silva *et al.* Quantifying the climate change-driven impacts on the hydrology of a data-scarce watershed located in the Brazilian Tropical Savanna. **Hydrological Processes**, v. 36, n. 7, jul. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/hyp.14638>. Acesso em: 12 jun. 2024.

ANA, Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (Brasil). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2021: relatório pleno**. Brasília: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2022. Disponível em: https://www.snirh.gov.br/portal/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/conjuntura_2021_pdf_final_revdirec.pdf. Acesso em: 15 jul. 2024.

ARNOLD, J. G. *et al.* Large Area Hydrologic Modeling and Assessment Part I: Model Development. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 34, n. 1, p. 73–89, 1998. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>. Acesso em: 10 abr. 2024.

ARNOLD, Jeffrey G. *et al.* **Soil and Water Assessment Toll: Input/Output Documentation, version 2012**. TX, USA: Texas Water Resources Institute Technical Report: College Station, 2012. Disponível em: <https://swat.tamu.edu/media/69296/swat-io-documentation-2012.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2023.

ARSISO, Bisrat Kifle; MENGISTU TSIDU, Gizaw. Land Use and Land Cover Change Modulates Hydrological Flows and Water Supply to Gaborone Dam Catchment, Botswana. **Water**, v. 15, n. 19, p. 3364, jan. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w15193364>. Acesso em: 23 ago. 2024.

BEZAK, Nejc *et al.* Soil erosion modelling: A bibliometric analysis. **Environmental Research**, v. 197, p. 111087, 1 jun. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111087>. Acesso em: 13 abr. 2024.

BIEGER, Katrin *et al.* 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. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12482>. Acesso em: 22 ago. 2024.

BONUMÁ, Nadia B. *et al.* Simulating Landscape Sediment Transport Capacity by Using a Modified SWAT Model. **Journal of Environmental Quality**, v. 43, n. 1, p. 55–66, jan. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.2134/jeq2012.0217>. Acesso em: 02 ago. 2024.

BOUSLIHIM, Yassine *et al.* The impact of soil data on SWAT modeling: Effects, requirements, and future directions. **Scientific African**, v. 28, p. e02694, 1 jun. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2025.e02694>. Acesso em: 15 ago. 2024.

BRASIL. **Water Resources**, 2014. Disponível em: <https://www.gov.br/mre/en/subjects/sustainable-development-and-the-environment/environment-and-climate-change/water-resources>. Acesso em: 29 abr. 2025.

BRESSIANI, Danielle de Almeida *et al.* Review of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) applications in Brazil: Challenges and prospects. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 8, n. 3, p. 9–35, 31 maio 2015. Disponível em: <https://ijabe.org/index.php/ijabe/article/view/1765>. Acesso em: 12 abr. 2024.

BRIGHENTI, Tássia Mattos *et al.* Two calibration methods for modeling streamflow and suspended sediment with the swat model. **Ecological Engineering**, v. 127, p. 103–113, feb. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.11.007>. Acesso em: 20 maio 2024

BROQUET, Mélanie *et al.* Habitat quality on the edge of anthropogenic pressures: Predicting the impact of land use changes in the Brazilian Upper Paraguay River Basin. **Journal of Cleaner Production**, v. 459, p. 142546, 25 jun. 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652624019942>. Acesso em: 15 jan. 2025.

CASTAGNA, Daniela *et al.* Evapotranspiration Assessment by Remote Sensing in Brazil with Focus on Amazon Biome: Scientometric Analysis and Perspectives for Applications in

Agro-Environmental Studies. **Hydrology**, v. 11, n. 3, p. 39, mar. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/hydrology11030039>. Acesso em: 15 set. 2024.

CECÍLIO, Roberto Avelino; PIMENTEL, Stefania Marques; ZANETTI, Sidney Sara. Modeling the influence of forest cover on streamflows by different approaches. **CATENA**, v. 178, p. 49–58, jul. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0341816219300876>. Acesso em: 02 set. 2024.

CHEN, Marcia; CATALDI, Marcio; FRANCISCO, Cristiane Nunes. Application of Hydrological Modeling Related to the 2011 Disaster in the Mountainous Region of Rio De Janeiro, Brazil. **Climate**, v. 11, n. 3, p. 55, feb. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/cli11030055>. Acesso em: 10 ago. 2024.

COSTA, Renata Cristina Araújo *et al.* Hydrologic Response to Land Use and Land Cover Change Scenarios: An Example from the Paraopeba River Basin Based on the SWAT Model. **Water**, v. 15, n. 8, p. 1451, abr. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w15081451>. Acesso em: 12 set. 2024.

COSTA, Renata Cristina Araújo *et al.* The modelling of river water contamination by tailings mudflows: The case of phosphorus in the Paraopeba River basin. **Case Studies in Chemical and Environmental Engineering**, v. 9, p. 100701, jun. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100701>. Acesso em: 02 fev. 2025.

DA SILVA, Glauciene Justino Ferreira *et al.* Multi-datasets to monitor and assess meteorological and hydrological droughts in a typical basin of the Brazilian semiarid region. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 196, n. 4, mar. 2024. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38489071/>. Acesso em: 15 dez. 2024.

DA SILVA, Lorena Souza *et al.* Assessment of changes in land use and occupation on the hydrological regime of a basin in the west of Bahia. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 123, p. 104218, mar. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104218>. Acesso em: 12 fev. 2024.

DA SILVA, Vicente de Paulo Rodrigues *et al.* Simulation of stream flow and hydrological response to land-cover changes in a tropical river basin. **CATENA**, v. 162, p. 166–176, mar. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0341816217303922>. Acesso em: 13 jun. 2024.

DE MELLO, Kaline *et al.* Riparian restoration for protecting water quality in tropical agricultural watersheds. **Ecological Engineering**, v. 108, p. 514–524, nov. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.06.049>. Acesso em: 15 nov. 2025.

DE OLIVEIRA, Vinícius Augusto *et al.* Modeling the effects of climate change on hydrology and sediment load in a headwater basin in the Brazilian Cerrado biome. **Ecological Engineering**, v. 133, p. 20–31, 1 ago. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.04.021>. Acesso em: 15 ago. 2024.

DHANESH, Yeganantham *et al.* A Comparative Evaluation of the Performance of CHIRPS and CFSR Data for Different Climate Zones Using the SWAT Model. **Remote Sensing**, v. 12, n. 18, p. 3088, set. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs12183088>. Acesso em: 02 set. 2024.

DIAS, Viviane de Souza *et al.* Historical Streamflow Series Analysis Applied to Furnas HPP Reservoir Watershed Using the SWAT Model. **Water**, v. 10, n. 4, p. 458, abr. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w10040458>. Acesso em: 12 ago. 2024.

DILL, Jonas; DAGIOS, Roberto Novaes; BARROS, Virginia Grace. Public policies on water resource management and their impacts on the context of climatic changes and alterations in land use and land cover in small and protected rainforest river basins. **Environmental Science & Policy**, v. 137, p. 191–204, nov. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.08.021>. Acesso em: 30 ago. 2024.

DOS SANTOS, Franciane Mendonça *et al.* Using the SWAT model to identify erosion prone areas and to estimate soil loss and sediment transport in Mogi Guaçu River basin in Sao Paulo State, Brazil. **CATENA**, v. 222, p. 106872, mar. 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S034181622200858X>. Acesso em: 15 nov. 2024.

DOS SANTOS, Franciane Mendonça; DE OLIVEIRA, Rodrigo Proença; MAUAD, Frederico Fábio. Lumped versus Distributed Hydrological Modeling of the Jacaré-Guaçu Basin, Brazil. **Journal of Environmental Engineering**, v. 144, n. 8, ago. 2018. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0001397](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001397). Acesso em: 12 ago. 2024.

DOS SANTOS, Franciane Mendonça; DE OLIVEIRA, Rodrigo Proença; MAUAD, Frederico Fábio. Evaluating a parsimonious watershed model versus SWAT to estimate streamflow, soil loss and river contamination in two case studies in Tietê river basin, São Paulo, Brazil. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 29, p. 100685, 1 jun. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100685>. Acesso em: 02 set. 2024.

DOS SANTOS, Franciane Mendonça; PROENÇA DE OLIVEIRA, Rodrigo; AUGUSTO DI LOLLO, José. Effects of Land Use Changes on Streamflow and Sediment Yield in Atibaia River Basin—SP, Brazil. **Water**, v. 12, n. 6, p. 1711, jun. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w12061711>. Acesso em: 14 ago. 2024.

DOS SANTOS, José Yure Gomes *et al.* Modeling the impacts of future LULC and climate change on runoff and sediment yield in a strategic basin in the Caatinga/Atlantic forest ecotone of Brazil. **CATENA**, v. 203, p. 105308, ago. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0341816221001673>. Acesso em: 03 nov. 2024.

DOS SANTOS, Vanessa *et al.* Hydrologic Response to Land Use Change in a Large Basin in Eastern Amazon. **Water**, v. 10, n. 4, p. 429, abr. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w10040429>. Acesso em: 15 out. 2024.

DURÃES, Matheus Fonseca; MELLO, Carlos Rogério de; NAGHETTINI, Mauro. Applicability of the swat model for hydrologic simulation in Paraopeba River basin, MG. **CERNE**, v. 17, n. 4, p. 481–488, dez. 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0104-77602011000400006>. Acesso em: 02 ago. 2024

FERRAZ, Lorena Lima *et al.* Hydrological modeling in an agricultural basin in the Brazilian Cerrado using satellite precipitation data. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 130, p. 104548, out. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104548>. Acesso em: 23 nov. 2024.

FERRAZ, Lorena Lima *et al.* Databases and Applications of the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) Model in Brazilian River Basins: a Review. **Environmental Modeling &**

Assessment, v. 30, n. 2, p. 349–367, 1 abr. 2025. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10666-024-10002-0>. Acesso em: 21 ago. 2025.

FERREIRA, Amanda do Nascimento *et al.* Evaluation of Evapotranspiration in Brazilian Cerrado Biome Simulated with the SWAT Model. **Water**, v. 13, n. 15, p. 2037, jul. 2021a. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w13152037>. Acesso em: 30 set. 2025.

FERREIRA, Filipe Henrique Miranda *et al.* Climate change in the Upper Paraguay Basin and hydrological impacts on the Pantanal. **Journal of Water and Climate Change**, v. 15, n. 7, p. 3210–3221, maio 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.2166/wcc.2024.081>. Acesso em: 02 abr. 2025.

FERREIRA, Renan Gon *et al.* Performance of hydrological models in fluvial flow simulation. **Ecological Informatics**, v. 66, p. 101453, dez. 2021b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2021.101453>. Acesso em: 26 maio 2024.

FISHER, Jonathan R. B. *et al.* Impact of satellite imagery spatial resolution on land use classification accuracy and modeled water quality. **Remote Sensing in Ecology and Conservation**, v. 4, n. 2, p. 137–149, ago. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/rse2.61>. Acesso em: 14 abr. 2025.

FRANCO, Ana Clara Lazzari; OLIVEIRA, Debora Yumi de; BONUMÁ, Nadia Bernardi. Comparison of single-site, multi-site and multi-variable SWAT calibration strategies. **Hydrological Sciences Journal**, v. 65, n. 14, p. 2376–2389, set. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1810252>. Acesso em: 06 jun. 2024.

FUJITA, Thais *et al.* Simulating Discharge in a Non-Dammed River of Southeastern South America Using SWAT Model. **Water**, v. 14, n. 3, p. 488, fev. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w14030488>. Acesso em: 23 jun. 2025.

FUKUNAGA, Danilo Costa *et al.* Application of the SWAT hydrologic model to a tropical watershed at Brazil. **CATENA**, v. 125, p. 206–213, fev. 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0341816214003154>. Acesso em: 31 ago. 2024.

GASSMAN, Philip W.; YINGKUAN. IJABE SWAT Special Issue: Innovative modeling solutions for water resource problems. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 8, n. 3, p. 1–8, 29 jun. 2015. Disponível em: <http://ijabe.net/article/doi/10.3965/j.ijabe.20150803.1763>. Acesso em: 23 maio 2024.

GIZAW, Negussie Kaleb *et al.* Evaluating SWAT model for streamflow estimation in the semi-arid Okavango-Omatako catchment, Namibia. **African Journal of Environmental Science and Technology**, v. 16, n. 11, p. 385–403, 30 nov. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.5897/AJEST2022.3155>. Acesso em: 15 jun. 2024.

JANJIĆ, Josip; TADIĆ, Lidija. Fields of Application of SWAT Hydrological Model—A Review. **Earth**, v. 4, n. 2, p. 331–344, jun. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/earth4020018>. Acesso em: 22 jul. 2024.

JUNQUEIRA, Rubens *et al.* Hydrological modeling using remote sensing precipitation data in a Brazilian savanna basin. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 115, p. 103773, abr. 2022a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.103773>. Acesso em: 15 out. 2025.

JUNQUEIRA, Rubens *et al.* Hydrological Retrospective and Historical Drought Analysis in a Brazilian Savanna Basin. **Water**, v. 14, n. 14, p. 2178, Jul. 2022b. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w14142178>. Acesso em: 01 set. 2024.

KROEGER, Timm *et al.* Returns on investment in watershed conservation: Application of a best practices analytical framework to the Rio Camboriú Water Producer program, Santa Catarina, Brazil. **Science of the Total Environment**, v. 657, p. 1368–1381, mar. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.116>. Acesso em: 15 abr. 2025.

LARRAZ, Beatriz *et al.* Socio-Economic Indicators for Water Management in the South-West Europe Territory: Sectorial Water Productivity and Intensity in Employment. **Water**, v. 16, n. 7, p. 959, Jan. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w16070959>. Acesso em: 15 out. 2025.

LINS, Frederico Abraão Costa *et al.* Soil moisture and hydrological processes dynamics under climate and land use changes in a semiarid experimental basin, Brazil. **Ecohydrology & Hydrobiology**, v. 24, n. 3, p. 681–697, jul. 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S164235932400020X>. Acesso em: 22 out. 2025.

LOPES, Tércio R. *et al.* Estimation of sediment production and soil loss in a water supply basin for the metropolitan region of São Paulo - Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 118, p. 103929, out. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.103929>. Acesso em: 15 maio 2024.

LOUKIKA, Kotapati Narayana *et al.* Predicting the Effects of Land Use Land Cover and Climate Change on Munneru River Basin Using CA-Markov and Soil and Water Assessment Tool. **Sustainability**, v. 14, n. 9, p. 5000, Jan. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su14095000>. Acesso em: 19 nov. 2024.

LUCAS-BORJA, Manuel Esteban *et al.* Impacts of land-use and climate changes on surface runoff in a tropical forest watershed (Brazil). **Hydrological Sciences Journal**, v. 65, n. 11, p. 1956–1973, jul. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1787417>. Acesso em: 20 dez. 2023.

LUZ, Marta *et al.* The Mitigation Potential of Buffer Strips for Reservoir Sediment Yields: The Itumbiara Hydroelectric Power Plant in Brazil. **Water**, v. 8, n. 11, p. 489, out. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w8110489>. Acesso em: 14 abr. 2024.

MAKUMBURA, Randika K. *et al.* Comparison of Calibration Approaches of the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) Model in a Tropical Watershed. **Hydrology**, v. 9, n. 10, p. 183, out. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/hydrology9100183>. Acesso em: 21 nov. 2024.

MAPBIOMAS. **The surface of water in Brazil has reduced by 15% since the early 1990s**, 2025. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/en/2021/08/23/superficie-de-agua-no-brasil-reduz-15-desde-o-inicio-dos-anos-90/>. Acesso em: 29 abr. 2025

MARCINKOWSKI, Paweł; PINIEWSKI, Mikołaj. Future changes in crop yield over Poland driven by climate change, increasing atmospheric CO₂ and nitrogen stress. **Agricultural Systems**, v. 213, p. 103813, 1 jan. 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0308521X23002184>. Acesso em: 20 jun. 2025.

MARTINS, Wander Araújo *et al.* Reduction of sediment yield by riparian vegetation recovery at distinct levels of soil erosion in a tropical watershed. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 45, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1413-7054202145028220>. Acesso em: 25 nov. 2024.

MAURI, Eliete Nazaré Eduardo *et al.* Hydrosedimentological modeling in a headwater basin in Southeast Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 44, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20200047>. Acesso em: 15 fev. 2025.

MONTEIRO, José A. F. *et al.* Accuracy of grid precipitation data for Brazil: application in river discharge modelling of the Tocantins catchment. **Hydrological Processes**, v. 30, n. 9, p. 1419–1430, nov. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/hyp.10708>. Acesso em: 24 jan. 2025.

MONTEIRO, José A. F. *et al.* Modelling the effect of riparian vegetation restoration on sediment transport in a human-impacted Brazilian catchment. **Ecohydrology**, v. 9, n. 7, p. 1289–1303, feb. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/eco.1726>. Acesso em: 23 jun. 2024.

MOREIRA, Luana Lavagnoli; SCHWAMBACK, Dimaghi; RIGO, Daniel. Sensitivity analysis of the Soil and Water Assessment Tools (SWAT) model in streamflow modeling in a rural river basin. **Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 13, n. 6, p. 1, nov. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2221>. Acesso em: 05 maio 2024.

MUHURY, Newton; APAN, Armando; MARASENI, Tek. Modelling Floodplain Vegetation Response to Climate Change, Using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) Model Simulated LAI, Applying Different GCM's Future Climate Data and MODIS LAI Data. **Remote Sensing**, v. 16, n. 7, p. 1204, jan. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs16071204>. Acesso em: 15 jan. 2025.

NEITSCH, Susan L.; ARNOLD, Jeff R.; WILLIAMS, J. R. **Soil and Water Assessment Tool: Theoretical Documentation Version 2009**. Texas A&M University, set. 2011. Disponível em: <https://swat.tamu.edu/media/99192/swat2009-theory.pdf>. Acesso em: 26 abr. 2024.

OLIVEIRA, LT *et al.* Hydrological simulation of a small forested catchment under different land use and forest management. **iForest - Biogeosciences and Forestry**, v. 13, n. 1, p. 301–308, ago. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1686594220301599>. Acesso em: 10 abr. 2024.

OLIVEIRA, Maxwell da Rosa *et al.* Mapping ecological corridors in the Upper Paraguay River Basin, Brazil: Applications for sustainability, public policy and decision-making. **Conservation Science and Practice**, v. 7, n. 7, p. e13267, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/csp2.13267>. Acesso em: 08 dez. 2025.

PEREIRA, Polyana *et al.* The water cycle of small catchments impacted with tailings mudflows: A study in the Ferro-Carvão watershed after the breakup of B1 dam in Brumadinho. **Science of The Total Environment**, v. 949, p. 174971, nov. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174971>. Acesso em: 19 maio 2025.

PINTO, Daniel Brasil Ferreira *et al.* Application of the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) for Sediment Transport Simulation at a Headwater Watershed in Minas Gerais State,

Brazil. **Transactions of the ASABE**, v. 56, n. 2, p. 697–709, 2013. Disponível em: <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=42668>. Acesso em: 05 out. 2024.

PISSARRA, Teresa Cristina Tarlé *et al.* Role of Mine Tailings in the Spatio-Temporal Distribution of Phosphorus in River Water: The Case of B1 Dam Break in Brumadinho. **Water**, v. 14, n. 10, p. 1572, maio 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w14101572>. Acesso em: 28 set. 2024.

RABELO, Udinart P. *et al.* Representing a dense network of ponds and reservoirs in a semi-distributed dryland catchment model. **Journal of Hydrology**, v. 603, p. 127103, dez. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169421011537>. Acesso em: 02 nov. 2025.

ROCHA, Everton Oliveira *et al.* The Contribution of Conservation Practices in Reducing Runoff, Soil Loss, and Transport of Nutrients at the Watershed Level. **Water Resources Management**, v. 26, n. 13, p. 3831–3852, jul. 2012. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11269-012-0106-1>. Acesso em: 19 ago. 2024.

RODRIGUES, Dulce B. B.; GUPTA, Hoshin V.; MENDIONDO, Eduardo M. A blue/green water-based accounting framework for assessment of water security. **Water Resources Research**, v. 50, n. 9, p. 7187–7205, set. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/2013WR014274>. Acesso em: 29 out. 2024.

RODRIGUES, Evandro Luis; JACOBI, Claudia Maria; FIGUEIRA, José Eugênio Côrtes. Wildfires and their impact on the water supply of a large neotropical metropolis: A simulation approach. **Science of The Total Environment**, v. 651, p. 1261–1271, fev. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.289>. Acesso em: 18 ago. 2024.

SERRÃO, Edivaldo Afonso de Oliveira *et al.* Four decades of hydrological process simulation of the Itacaiúnas river watershed, southeast Amazon. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 25, n. 3, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1982-21702019000300018>. Acesso em: 18 jul. 2024.

SERRÃO, Edivaldo Afonso de Oliveira *et al.* Impacts of land use and land cover changes on hydrological processes and sediment yield determined using the SWAT model. **International Journal of Sediment Research**, v. 37, n. 1, p. 54–69, fev. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2021.04.002>. Acesso em: 23 set. 2024.

SILVA, Antonio K. L. *et al.* Estimation of sediment production in oil palm expansion areas in the Amazon. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, n. 5, p. 344–348, maio 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n5p344-348>. Acesso em: 20 abr. 2024.

SILVA, Thais Palumbo *et al.* Evaluating hydrological and soil erosion processes in different time scales and land uses in southern Brazilian paired watersheds. **Hydrological Sciences Journal**, v. 68, n. 10, p. 1391–1408, jun. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/02626667.2023.2217333>. Acesso em: 22 set. 2024.

SIQUEIRA, Paula Prado *et al.* Effects of climate and land cover changes on water availability in a Brazilian Cerrado basin. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 37, p. 100931, out. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100931>. Acesso em: 16 jan. 2024.

SRINIVASAN, Raghavan; ARNOLD, Jeffrey G. Integration of a basin-scale water quality model with GIS 1. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 30,

n. 3, p. 453-462, 1994. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1994.tb03304.x>. Acesso em: 15 ago. 2023.

STRAUCH, Michael *et al.* The impact of Best Management Practices on simulated streamflow and sediment load in a Central Brazilian catchment. **Journal of Environmental Management**, v. 127, p. S24–S36, set. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.01.014>. Acesso em: 18 out. 2023.

STRAUCH, Michael; VOLK, Martin. SWAT plant growth modification for improved modeling of perennial vegetation in the tropics. **Ecological Modeling**, v. 269, p. 98–112, Nov. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.08.013>. Acesso em: 14 jan. 2024.

TAFFARELLO, Denise *et al.* Modeling freshwater quality scenarios with ecosystem-based adaptation in the headwaters of the Cantareira system, Brazil. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 22, n. 9, p. 4699–4723, set. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/hess-22-4699-2018>. Acesso em: 19 maio 2024.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**, 4. ed.; ABRH: Porto Alegre, Brasil, 2012; 944 p.

UZEIKA, Talita *et al.* Use of the SWAT model for hydro-sedimentologic simulation in a small rural watershed. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 2, p. 557–565, abr. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000200025>. Acesso em: 21 ago. 2024.

VALENCIA, Jhon B. *et al.* Assessing the Effectiveness of the Use of the InVEST Annual Water Yield Model for the Rivers of Colombia: A Case Study of the Meta River Basin. **Water**, v. 15, n. 8, p. 1617, jan. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w15081617>. Acesso em: 15 jun. 2023.

VAN RIPER, Carena J. *et al.* Understanding the spatial dynamics of values and disvalues in the Kaskaskia River Watershed, USA through a social-ecological lens. **Ecosystems and People**, v. 20, n. 1, p. 2309391, 31 dez. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/26395916.2024.2309391>. Acesso em: 16 maio 2025.

VIANA, Jussara Freire de Souza *et al.* Evaluation of gridded meteorological datasets and their potential hydrological application to a humid area with scarce data for Pirapama River basin, northeastern Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 145, n. 1–2, p. 393–410, maio 2021. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00704-021-03628-7>. Acesso em: 23 jul. 2024.

VIANA, Jussara Freire de Souza *et al.* Land Use and Land Cover Trends and Their Impact on Streamflow and Sediment Yield in a Humid Basin of Brazil's Atlantic Forest Biome. **Diversity**, v. 15, n. 12, p. 1220, dez. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/d15121220>. Acesso em: 14 out. 2024.

WWF. **Falta de água potável preocupa 81% dos brasileiros, aponta estudo**. Disponível em: <https://www.wwf.org.br/?85100/Falta-de-agua-potavel-preocupa-81-dos-brasileiros-aponta-estudo>. Acesso em: 29 abr. 2025.

XIE, Hua; RINGLER, Claudia. Agricultural nutrient loadings to the freshwater environment: the role of climate change and socioeconomic change. **Environmental Research Letters**, v. 12, n. 10, p. 104008, out. 2017. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aa8148>. Acesso em: 10 dez. 2024.

ZARE, Mohammad; AZAM, Shahid; SAUCHYN, David. Evaluation of Soil Water Content Using SWAT for Southern Saskatchewan, Canada. **Water**, v. 14, n. 2, p. 249, jan. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w14020249>. Acesso em: 23 dez. 2025.

APÊNDICE A

Lista dos 119 artigos avaliados na análise de cientometria sobre a aplicação do modelo SWAT no Brasil, com os nomes dos autores, títulos, anos de publicação, revistas e respectivos DOI.

Autores	DOI	Year	Source
DURAES M; DE MELLO C; NAGHETTINI M	10.1590/S0104-77602011000400006	2011	Cerne
ANDRADE M; DE MELLO C; BESKOW S	10.1590/S1415-43662013000100010	2012	Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental
LELIS T; CALIJURI M; DA F S A; DE LIMA D; ROCHA E D O	10.1590/S0100-06832012000200031	2012	Revista Brasileira de Ciência do Solo
ROCHA E; CALIJURI M; SANTIAGO A; DE ASSIS L; ALVES L	10.1007/s11269-012-0106-1	2012	Water Resources Management
UZEIKA T; MERTEN G; MINELLA J; MORO M	10.1590/S0100-06832012000200025	2012	Revista Brasileira de Ciência do Solo
DA SILVA R; SANTOS C; SILVA V; SILVA L	10.1007/s10661-013-3228-x	2013	Environmental Monitoring and Assessment
PINTO D; DA SILVA A; BESKOW S; DE MELLO C; COELHO G	10.13031/2013.42668	2013	Transactions of the Asabe
STRAUCH M; VOLK M	10.1016/j.ecolmodel.2013.08.013	2013	Ecological Modelling
STRAUCH M; LIMA J; VOLK M; LORZ C; MAKESCHIN F	10.1016/j.jenvman.2013.01.014	2013	Journal of Environmental Management
BONUMÁ N; ROSSI C; ARNOLD J; REICHERT J; MINELLA J; ALLEN P; VOLK M	10.2134/jeq2012.0217	2014	Journal of Environmental Quality
PEREIRA D; MARTINEZ M; DE ALMEIDA A; PRUSKI F; DA SILVA D; ZONTA J	10.1590/S0100-69162014000400018	2014	Engenharia Agrícola
RODRIGUES D; GUPTA H; MENDIONDO E	10.1002/2013WR014274	2014	Water Resources Research
BRESSIANI D; SRINIVASAN R; JONES C; MENDIONDO E	10.3965/j.ijabe.20150803.970	2015	International Journal of Agricultural and Biological Engineering
BRESSIANI D; GASSMAN P; FERNANDES J; GARBOSSA L; SRINIVASAN R; BONUMÁ N; MENDIONDO E	10.3965/j.ijabe.20150803.1765	2015	International Journal of Agricultural and Biological Engineering
CREECH C; SIQUEIRA R; SELEGAN J; MILLER C	10.3965/j.ijabe.20150803.1372	2015	International Journal of Agricultural and Biological Engineering
FUKUNAGA D; CECILIO R; ZANETTI S; OLIVEIRA L; CAIADO M	10.1016/j.catena.2014.10.032	2015	Catena
GASSMAN P; WANG Y	10.3965/j.ijabe.20150803.1763	2015	International Journal of Agricultural and Biological Engineering
RODRIGUES E; ELMIRO M; BRAGA F; JACOBI C; ROSSI R	10.1590/1807-1929/agriambi.v19n1p70-76	2015	Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental
DA SILVA V; SILVA M; DE SOUZA E	10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v36n6p1005-1015/2016	2016	Engenharia Agrícola
EDUARDO E; DE MELLO C; VIOLA M; OWENS P; CURI N	10.1590/1413-70542016404009516	2016	Ciência e Agrotecnologia
LUZ M; BEEVERS L; CUTHBERTSON A; MEDERO G; DIAS V; NASCIMENTO D	10.3390/w8110489	2016	Water
MONTEIRO J; KAMALI B; SRINIVASAN R; ABBASPOUR K; GÜCKER B	10.1002/eco.1726	2016	Ecohydrology
MONTEIRO J; STRAUCH M; SRINIVASAN R; ABBASPOUR K; GÜCKER B	10.1002/hyp.10708	2016	Hydrological Processes
DE MELLO K; RANDHIR T; VALENTE R; VETTORAZZI C	10.1016/j.ecoleng.2017.06.049	2017	Ecological Engineering
XIE H; RINGLER C	10.1088/1748-9326/aa8148	2017	Environmental Research Letters
ABE C; LOBO F; DIBIKE Y; COSTA M; DOS SANTOS V; NOVO E	10.3390/w10070932	2018	Water
ALMEIDA R; PEREIRA S; PINTO D	10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v38n1p55-63/2018	2018	Engenharia Agrícola
DA SILVA R; DANTAS J; BELTRAO J; SANTOS C	10.2166/nh.2018.222	2018	Hydrology Research

DA SILVA V; SILVA M; SINGH V; DE SOUZA E; BRAGA C; DE HOLANDA R; ALMEIDA R; DE SOUSA F; BRAGA A	10.1016/j.catena.2017.11.024	2018	Catena
DE OLIVEIRA V; DE MELLO C; VIOLA M; SRINIVASAN R	10.1590/01047760201824042573	2018	Cerne
DIAS V; DA LUZ M; MEDERO G; NASCIMENTO D; DE OLIVEIRA W; MERELLES L	10.3390/w10040458	2018	Water
DOS SANTOS F; DE OLIVEIRA R; MAUAD F	10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001397	2018	Journal of Environmental Engineering
DOS SANTOS V; LAURENT F; ABE C; MESSNER F	10.3390/w10040429	2018	Water
FISHER J; ACOSTA E; DENNEDY-FRANK P; KROEGER T; BOUCHER T	10.1002/rse2.61	2018	Remote Sensing in Ecology and Conservation
HERNANDES T; SCARPARE F; SEABRA J	10.1016/j.agee.2018.02.026	2018	Agriculture Ecosystems & Environment
HERNANDES T; SCARPARE F; SEABRA J	10.1016/j.jclepro.2018.06.297	2018	Journal of Cleaner Production
LAMPARTER G; NOBREGA R; KOVACS K; AMORIM R; GEROLD G	10.1007/s10113-016-1015-2	2018	Regional Environmental Change
MEIRA NETO A; OLIVEIRA P; RODRIGUES D; WENDLAND E	10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001639	2018	Journal of Hydrologic Engineering
MOREIRA L; SCHWAMBACK D; RIGO D	10.4136/ambi-agua.2221	2018	Revista Ambiente e Água
SANTOS C; ALMEIDA C; RAMOS T; ROCHA F; OLIVEIRA R; NEVES R	10.3390/w10091137	2018	Water
SILVA A; DE SOUSA A; DOS SANTOS J; VILLELA J; MARTORANO L; CRESTANA S	10.1590/1807-1929/agriambi.v22n5p344-348	2018	Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental
TAFFARELLO D; SRINIVASAN R; MOHOR G; GUIMARAES J; CALIJURI M; MENDIONDO E	10.5194/hess-22-4699-2018	2018	Hydrology and Earth System Sciences
ABOU R S; UVO C; MARTINS J; DOMINGUES L; RUDKE A; FUJITA T; FREITAS E	10.3390/w11050882	2019	Water
BRIGHENTI T; BONUMÁ N; GRISON F; MOTA A; KOBIYAMA M; CHAFFE P	10.1016/j.ecoleng.2018.11.007	2019	Ecological Engineering
CECÍLIO R; PIMENTEL S; ZANETTI S	10.1016/j.catena.2019.03.006	2019	Catena
DE ANDRADE C; MONTENEGRO S; MONTENEGRO A; LIMA J; SRINIVASAN R; JONES C	10.1016/j.ecohyd.2018.09.002	2019	Ecohydrology & Hydrobiology
DE MEDEIROS I; SILVA J; SILVA R; SANTOS C	10.1007/s13762-018-1940-3	2019	International Journal of Environmental Science and Technology
DE OLIVEIRA V; DE MELLO C; BESKOW S; VIOLA M; SRINIVASAN R	10.1016/j.ecoleng.2019.04.021	2019	Ecological Engineering
KROEGER T; KLEMZ C; BOUCHER T; FISHER J; ACOSTA E; CAVASSANI A; DENNEDY-FRANK P; GARBOSSE L; BLAINSKI E; SANTOS R; GIBERTI S; PETRY P; SHERMIE D; DACOL K	10.1016/j.scitotenv.2018.12.116	2019	Science of the Total Environment
NUNES H; DE SOUSA A; DOS SANTOS J	10.1590/2179-8087.017116	2019	Floresta e Ambiente
RAFAELI NETO S; SÁ E; DEBASTIANI A; PADILHA V; ANTUNES T	10.1007/s11269-018-2086-2	2019	Water Resources Management
RODRIGUES E; JACOBI C; FIGUEIRA J	10.1016/j.scitotenv.2018.09.289	2019	Science Of The Total Environment
SANTOS C; ROCHA F; RAMOS T; ALVES L; MATEUS M; DE OLIVEIRA R; NEVES R	10.3390/w11010170	2019	Water
SERRÃO E; SILVA M; DE SOUSA F; DE LIMA A; DOS SANTOS C; DE ATAIDE L; DA SILVA V	10.1590/s1982-21702019000300018	2019	Boletim de Ciências Geodesicas
VIANA J; MONTENEGRO S; DA S B; DA S R; SRINIVASAN R	10.4090/juee.2019.v13n1.042058	2019	Journal of Urban and Environmental Engineering
ALVARENGA L; CARVALHO V; DE OLIVEIRA V; DE MELLO C; COLOMBO A; TOMASELLA J; MELO P	10.4136/ambi-agua.2492	2020	Revista Ambiente e Água
AMORIM J; VIOLA M; JUNQUEIRA R; DE OLIVEIRA V; DE MELLO C	10.3390/w12092571	2020	Water
DHANESH Y; BINDHU V; SENENT-APARICIO J; BRIGHENTI T; AYANA E; SMITHA P; FEI C; SRINIVASAN R	10.3390/rs12183088	2020	Remote Sensing
DOS SANTOS F; DE O R; MAUAD F	10.1016/j.ejrh.2020.100685	2020	Journal of Hydrology-Regional Studies
DOS SANTOS F; DE OLIVEIRA R; DI LOLLO J	10.3390/w12061711	2020	Water
FRANCO A; DE OLIVEIRA D; BONUMÁ N	10.1080/02626667.2020.1810252	2020	Hydrological Sciences Journal

LOPES T; FOLEGATTI M; DUARTE S; ZOLIN C; FRAGA JUNIOR L; MOURA L; OLIVEIRA R; SANTOS O	10.1016/j.jsames.2020.102752	2020	Journal of South American Earth Sciences
LUCAS-BORJA M; CARRÁ B; NUNES J; BERNARD-JANNIN L; ZEMA D; ZIMBONE S	10.1080/02626667.2020.1787417	2020	Hydrological Sciences Journal
MAURI E; VIOLA M; NORTON L; OWENS P; DE MELLO C; PINTO L; CURI N	10.36783/18069657rbc20200047	2020	Revista Brasileira de Ciência do Solo
NUNES G; MINOTI R; KOIDE S	10.3390/hydrology7040085	2020	Hydrology
OLIVEIRA L; CECÍLIO R; ZANETTI S; LOOS R; BRESSIANI D; SRINIVASAN R	10.3832/for3221-013	2020	Iforest-Biogeoecosciences and Forestry
SERRÃO E; SILVA M; FERREIRA T; DA SILVA V D P R; DE SOUSA D S F; DE LIMA A; DE ATAIDE L; WANZELER R	10.1016/j.scitotenv.2020.140981	2020	Science of the Total Environment
ABOU R S; DE FREITAS E; MARTINS J; MACHADO C; UVO C	10.1007/s10113-021-01827-6	2021	Regional Environmental Change
ANDRADE C; MONTENEGRO S; MONTENEGRO A; LIMA J; SRINIVASAN R; JONES C	10.1002/joc.6751	2021	International Journal of Climatology
DE SOUSA L; SANTOS C; GOMES R; ROCHA F; DE JESUS R	10.1007/s13762-020-02997-2	2021	International Journal of Environmental Science and Technology
DOS SANTOS J; MONTENEGRO S; DA SILVA R; SANTOS C; QUINN N; DANTAS A; RIBEIRO NETO A	10.1016/j.catena.2021.105308	2021	Catena
EGER G; SILVA JUNIOR G; MARQUES E; LEA B; DA ROCHA D; GILMORE T; DO AMARAL L; SILVA J; NEALE C	10.1016/j.jsames.2021.103601	2021	Journal of South American Earth Sciences
FERREIRA A; DE ALMEIDA A; KOIDE S; MINOTI R; DE SIQUEIRA M	10.3390/w13152037	2021	Water
FERREIRA R; DIAS R; CASTRO J; DOS SANTOS V; CALIJURI M; DA SILVA D	10.1016/j.ecoinf.2021.101453	2021	Ecological Informatics
GOMES L; BIANCHI F; CARDOSO I; SCHULTE R; FERNANDES R; FERNANDES- FILHO E	10.1016/j.jhydrol.2020.125650	2021	Journal of Hydrology
LOPES T; ZOLIN C; MINGOTI R; VENDRUSCULO L; DE ALMEIDA F; DE SOUZA A; DE OLIVEIRA R; PAULINO J; ULIANA E	10.1016/j.jsames.2021.103224	2021	Journal of South American Earth Sciences
MARTINS M; VALERA C; ZANATA M; SANTOS R; ABDALA V; PACHECO F; FERNANDES L; PISSARRA T	10.3390/w13223249	2021	Water
MARTINS W; MARTINS L; DE MARIA I; DE MORAES J; PEDRO JÚNIOR M	10.1590/1413-7054202145028220	2021	Ciência e Agrotecnologia
RABELO U; DIETRICH J; COSTA A; SIMSHÄUSER M; SCHOLZ F; NGUYEN V; LIMA NETO I	10.1016/j.jhydrol.2021.127103	2021	Journal of Hydrology
SERRÃO E; SILVA M; FERREIRA T; DE ATAIDE L; WANZELER R; DA SILVA V; DE LIMA A; DE SOUSA F	10.1016/j.ecohyd.2020.09.002	2021	Ecohydrology & Hydrobiology
SILVA J; DA SILVA R; SANTOS C; SILVA A; VIANNA P	10.1007/s11069-021-04736-3	2021	Natural Hazards
SIQUEIRA P; OLIVEIRA P; BRESSIANI D; MEIRA NETO A; RODRIGUES D	10.1016/j.ejrh.2021.100931	2021	Journal of Hydrology-Regional Studies
VIANA J; MONTENEGRO S; DA SILVA B; DA SILVA R; SRINIVASAN R; SANTOS C; ARAUJO D; TAVARES C	10.1007/s00704-021-03628-7	2021	Theoretical and Applied Climatology
ABOU R S; UVO C; MARTINS J; MACHADO C; FREITAS E	10.1016/j.jenvman.2022.114651	2022	Journal of Environmental Management
AMORIM J; VIOLA M; JUNQUEIRA R; DE MELLO C; BENTO N; AVANZI J	10.1002/hyp.14638	2022	Hydrological Processes
DA FONSECA C; AL-ANSARI N; DA SILVA R; SANTOS C; ZEROUALI B; DE OLIVEIRA D; ELBELTAGI A	10.3390/ijgi11050272	2022	Isprs International Journal of Geo-Information
DE FREITAS L; DE MORAES J; DA COSTA A; MARTINS L; SILVA B; AVANZI J; UEZU A	10.3390/earth3030042	2022	Earth
DILL J; DAGIOS R; BARROS V	10.1016/j.envsci.2022.08.021	2022	Environmental Science And Policy
FUJITA T; DE MORAIS M; DOS SANTOS V; RUDKE A; DE EIRAS M; XAVIER A; ABOU R S; SANTOS E; MARTINS L; UVO C; DE SOUZA R; DE FREITAS E; MARTINS J	10.3390/w14030488	2022	Water
JUNQUEIRA R; VIOLA M; AMORIM J; CAMARGOS C; DE MELLO C	10.1016/j.jsames.2022.103773	2022	Journal of South American Earth Sciences

JUNQUEIRA R; VIOLA M; AMORIM J; WONGCHUIG S; DE MELLO C; VIEIRA- FILHO M; COELHO G	10.3390/w14142178	2022	Water
LOPES T; NASCIMENTO J; PACHECO A; DUARTE S; NEALE C; FOLEGATTI M	10.1016/j.jsames.2022.103929	2022	Journal of South American Earth Sciences
OLIVEIRA A; GRACELLI R; SILVA A; DOS SANTOS V; CASTRO J; CALIJURI M	10.22201/igeof.00167169p.2022.61. 1.2189	2022	Geofísica Internacional
PISSARRA T; COSTA R; DO VALLE JUNIOR R; SILVA M; DA COSTA A; FERNANDES L; DE MELO M; VALERA C; PACHECO F	10.3390/w14101572	2022	Water
RIBEIRO C; DIOTTO A; THEBALDI M; RODRIGUES J; VIOLA M	10.2166/ws.2022.184	2022	Water
SÁ E; BERTOL I; RAFAELI NETO S; SCHIER D	10.1590/1807- 1929/agriambi.v26n3p204-211	2022	Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental
SERRÃO E; SILVA M; FERREIRA T; DE ATAIDE L; DOS SANTOS C; DE LIMA A; DA SILVA V; DE SOUSA F; GOMES D	10.1016/j.ijsrc.2021.04.002	2022	International Journal of Sediment Research
SILVA A; DA SILVA R; SANTOS C; LINHARES F; XAVIER A	10.1080/10106049.2022.2068672	2022	Geocarto International
ACOSTA E; CHO S; KLEMM C; REAPPLE J; BARRETO S; CIASCA B; LEÓN J; ROGÉLIZ- PRADA C; BRACALE H	10.3390/w15040681	2023	Water
ALMEIDA A; MACEDO D; SANTOS H; RIBEIRO S; HUGHES R	10.1590/2318-0331.282320230034	2023	Revista Brasileira de Recursos Hídricos
CHEN M; CATALDI M; FRANCISCO C	10.3390/cli11030055	2023	Climate
COSTA R C A; SANTOS R; FERNANDES L; CARVALHO D M M; VALERA C; VALLE JUNIOR R; SILVA M; PACHECO F; PISSARRA T	10.3390/w15081451	2023	Water
DA SILVA L S; FERRAZ L; DE SOUSA L F; DE JESUS R M; SANTOS C A S; ROCHA F	10.1016/j.jsames.2023.104218	2023	Journal of South American Earth Sciences
DOS SANTOS F; PELINSON N; DE OLIVEIRA R; DI LOLLO J	10.1016/j.catena.2022.106872	2023	Catena
FARIAS C; MIRANDA R; VIANA J; LINS F; PEREIRA J; URSULINO B; MONTENEGRO S; GALVÍNCIO J; MONTENEGRO A; SRINIVASAN R	10.26848/rbgf.v16.6.p3572-3592	2023	Revista Brasileira de Geografia Física
FERRAZ L; SANTANA G; AMORIM J; DE JESUS R; SANTOS C	10.1016/j.jsames.2023.104548	2023	Journal of South American Earth Sciences
RUFINO P; GÜCKER B; FARAMARZI M; BOËCHAT I; CARDOZO F; SANTOS P; ZANIN G; MATAVELI G; PEREIRA G	10.3390/geographies3010001	2023	Geographies
SERRÃO E; SILVA M; FERREIRA T; XAVIER A; DOS SANTOS C; DE ATAIDE L; PONTES P; DA SILVA V	10.1016/j.jclepro.2022.135700	2023	Journal of Cleaner Production
SILVA T; BRESSIANI D; EBLING E; DEUS JUNIOR J; REICHERT J	10.1080/02626667.2023.2217333	2023	Hydrological Sciences Journal
VIANA J; MONTENEGRO S; SRINIVASAN R; SANTOS C; MISHRA M; KALUMBA A; DA SILVA R	10.3390/d15121220	2023	Diversity-Basel
COSTA D; BAYISSA Y; VILLAS-BOAS M; MASKEY S; LUGON JUNIOR J; DA SILVA NETOE A; SRINIVASAN R	10.1016/j.scitotenv.2024.174417	2024	Science of the Total Environment
COSTA R C A; BESSA S R; SANCHES F L; LEAL P F; DE MELO M C; VALERA C; DO VALLE JUNIOR R F; SILVA M M A P D M; PISSARRA T C T	10.1016/j.cscee.2024.100701	2024	Case Studies in Chemical and Environmental Engineering
DA SILVA G; DA SILVA R; BRASIL NETO R; SILVA J; DANTAS A; SANTOS C	10.1007/s10661-024-12461-0	2024	Environmental Monitoring and Assessment
FERREIRA F; DE SOUSA JÚNIOR W; BRESSIANI D; MENDES FILHO W; GONÇALVES D	10.2166/wcc.2024.081	2024	Journal of Water and Climate Change
FRADE T; SANTOS C; DA SILVA R	10.1007/s00477-024-02777-1	2024	Stochastic Environmental Research and Risk Assessment
LINS F; MONTENEGRO A; FARIAS C; DA SILVA M; DE SOUZA W; MOURA G; DA SILVA T; MONTENEGRO S	10.1016/j.ecohyd.2024.02.001	2024	Ecohydrology & Hydrobiology
NOGUEIRA M; DA SILVA P; MINOTI R	10.5327/Z2176-94781743	2024	Revista Brasileira de Ciências Ambientais
PEREIRA P; FERNANDES L; DO VALLE JUNIOR R J; SILVA M; VALERA C; DE MELO M; PISSARRA T; PACHECO F	10.1016/j.scitotenv.2024.174971	2024	Science of the Total Environment
SILVA T; BRESSIANI D; EBLING E; REICHERT J	10.1016/j.iswcr.2023.06.003	2024	International Soil and Water Conservation Research

4. ARTIGO 03: CALIBRAÇÃO MULTIVARIADA DO SWAT (SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL) EM BACIA HIDROGRÁFICA NO SUL DA AMAZÔNIA

RESUMO

O SWAT é um modelo hidrológico amplamente utilizado em diferentes bacias hidrográficas ao redor do mundo, apresentando diversas possibilidades de aplicação. Tradicionalmente, seu processo de calibração baseia-se exclusivamente em dados de vazão; entretanto, a incorporação da evapotranspiração (ET) pode aprimorar a representação do balanço hídrico das bacias hidrográficas. Nesse contexto, este estudo teve como objetivo aplicar uma abordagem de calibração multivariada na bacia hidrográfica do rio Peixoto de Azevedo, integrando dados observados de vazão e estimativas de evapotranspiração de referência (ET_0) obtidas pelos métodos de Penman-Monteith, Camargo e pelo produto MOD16A2. Buscou-se verificar se essa estratégia proporciona ganhos na consistência física do modelo SWAT, promovendo uma representação mais realista da dinâmica hidrológica da bacia. A discretização da bacia resultou em 107 sub-bacias e 7.551 Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs). Na análise de sensibilidade, sete parâmetros foram identificados como mais influentes no processo de calibração. O desempenho do modelo, avaliado pelo índice de eficiência de Kling-Gupta (KGE), foi de 0,691 para a calibração univariada, 0,424 para a calibração multivariada utilizando a ET_0 estimada pelo método de Camargo, 0,027 com o produto MOD16A2 e 0,803 quando utilizada a ET_0 estimada pelo método de Penman-Monteith. Entre as estratégias avaliadas, a integração da ET_0 de Penman-Monteith apresentou o melhor desempenho, mostrando-se a abordagem mais robusta e recomendada. Além de melhorar o ajuste estatístico do modelo, essa estratégia atua como um restritor físico do balanço hídrico, reduzindo a ocorrência de compensações matemáticas irrealistas entre os componentes de armazenamento e fluxo de água e proporcionando uma representação hidrológica mais consistente da bacia.

Palavras-chave: Vazão líquida; Evapotranspiração de referência; Brasil; MODIS; Penman-Monteith.

ABSTRACT

The Soil and Water Assessment Tool (SWAT) is a widely used hydrological model with diverse applications across watersheds worldwide. Traditionally, SWAT calibration relies exclusively on streamflow data; however, incorporating evapotranspiration (ET) can improve the representation of the watershed water balance. In this context, this study aimed to apply a multivariable calibration approach in the Peixoto de Azevedo River watershed by integrating observed streamflow data with reference evapotranspiration (ET_0) estimates obtained using the Penman-Monteith and Camargo methods, as well as the MOD16A2 product. The objective was

to evaluate whether this strategy enhances the physical consistency of the SWAT model, providing a more realistic representation of the watershed's hydrological dynamics. The watershed was discretized into 107 sub-basins and 7,551 Hydrologic Response Units (HRUs). Sensitivity analysis identified seven parameters as the most influential in the calibration process. Model performance, assessed using the Kling–Gupta Efficiency (KGE), yielded values of 0.691 for the univariate calibration, 0.424 for the multivariable calibration using ET_0 estimated by the Camargo method, 0.027 using the MOD16A2 product, and 0.803 when ET_0 estimated by the Penman–Monteith method was incorporated. Among the evaluated strategies, integrating Penman–Monteith ET_0 provided the best performance, proving to be the most robust and recommended approach. Beyond improving the statistical fit of the hydrograph, this strategy acts as a physical constraint on the watershed water balance, reducing unrealistic mathematical compensations among water storage and flow components and yielding a more physically consistent representation of the watershed hydrology.

Palavras-chave: Discharge; Reference evapotranspiration; Brazil; MODIS; Penman-Monteith.

4.1. Introdução

A modelagem hidrológica é amplamente empregada na gestão de recursos hídricos por permitir a simulação integrada dos processos físicos que controlam o ciclo hidrológico e possibilita por exemplo a avaliação de cenários associados a mudanças climáticas (Siqueira et al., 2021; Abou Rafee et al., 2021; Amorim et al., 2022; Frade; Santos; Da Silva, 2024; Ferraz et al., 2025b) e alterações no uso e cobertura da terra (Serrão et al., 2022; Da Silva et al., 2023; Ferreira et al., 2024; Lins et al., 2024; Moura et al., 2025). Entre os modelos de base física e caráter semidistribuído, o Soil and Water Assessment Tool (SWAT) destaca-se pela capacidade de representar a heterogeneidade espacial de bacias hidrográficas (Neitsch; Arnold; Williams, 2011; Arnold et al., 2012b; Janjić; Tadić, 2023). No entanto, a confiabilidade das simulações depende diretamente da qualidade do processo de calibração, que está sujeito a incertezas relacionadas à estrutura do modelo, aos dados de entrada e à parametrização dos processos hidrológicos (Arnold et al., 2012a; Abbaspour; Vaghefi; Srinivasan, 2018; Ferraz et al., 2025c).

A calibração do SWAT tem sido realizada predominantemente com base em séries de dados de vazão líquida observadas (Abbaspour; Vaghefi; Srinivasan, 2018; Almeida; Pereira; Pinto, 2018). Embora essa abordagem permita reproduzir adequadamente a resposta hidrológica integrada do sistema, ela não garante a representação realista dos demais componentes internos do balanço hídrico. Processos como a evapotranspiração, a infiltração e o armazenamento de água no solo, que podem apresentar inconsistências mesmo quando a vazão líquida simulada apresenta bom desempenho estatístico (Ferreira et al., 2021a).

Nesse contexto, a incorporação da evapotranspiração como variável adicional no processo de calibração pode aprimorar a consistência física do modelo (Franco; Oliveira; Bonumá, 2020; Dangol et al., 2023). A evapotranspiração é um importante componente de saída do balanço hídrico, especialmente em regiões tropicais, exercendo forte controle sobre a disponibilidade hídrica e a geração de escoamento superficial (Ruhoff et al., 2022; Ferreira et al., 2023) .

A estimativa da evapotranspiração (ET) por meio de métodos convencionais baseados em dados de estações meteorológicas apresenta desafios operacionais, dada a elevada exigência de variáveis de entrada. Modelos fisicamente robustos, como de Penman-Monteith, demandam séries de dados contínuos e precisos de radiação líquida, temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento (Tanaka et al., 2016). Contudo, a aplicação dessas equações é frequentemente limitada pela baixa densidade de redes de monitoramento terrestre em diversas regiões, onde a escassez de estações meteorológicas ou a presença de lacunas temporais nos registros impossibilita uma caracterização climática representativa.

O sensoriamento remoto surge como alternativa estratégica, pois supera as limitações das observações pontuais terrestres das estações meteorológicas, possibilitando o monitoramento contínuo da variabilidade espaço-temporal da evapotranspiração em toda a extensão da bacia hidrográfica. A incorporação dessas informações espacialmente distribuídas no processo de calibração amplia o conjunto de variáveis observáveis utilizadas pelo modelo, criando condições para a calibração multivariada do modelo SWAT.

A calibração multivariada (quando há mais de uma variável na calibração), considerando a vazão líquida e a evapotranspiração, apresentou resultados positivos em aplicações realizadas em bacias hidrográficas brasileiras (Franco; Bonumá, 2017; Franco; Oliveira; Bonumá, 2020; Lins et al., 2024), bem como em estudos internacionais (Lee et al., 2021; Dangol et al., 2023; Ningthoujam; Romeji, 2025; Zheng et al., 2025).

A bacia hidrográfica do rio Peixoto de Azevedo, localizada na região norte do estado de Mato Grosso (Sul do bioma Amazônia), apresenta intensa atividade aurífera, alterações no uso do solo (de pecuária extensiva para lavouras), elevado percentual de degradação de áreas de preservação permanente (APPs) e grande fragilidade ambiental potencial e emergente (Kraeski et al., 2022). Essa região apresenta elevada importância socioeconômica para o estado de Mato Grosso e traduz, os processos de ocupação e exploração dos recursos naturais na Amazônia, permitindo, assim, ser considerada um exemplo atual de cenários ambientais futuros para outras bacias hidrográficas amazônicas, especialmente aquelas com abundância de recursos minerais.

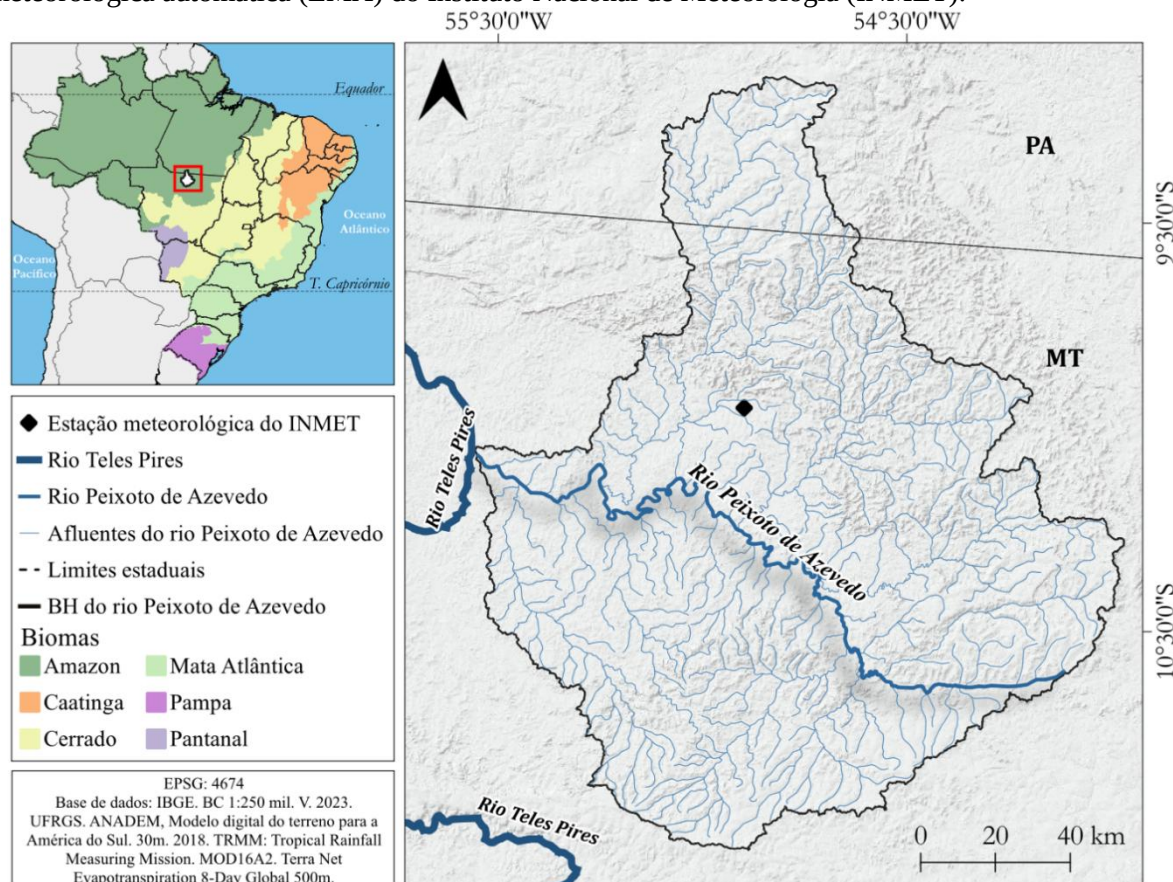
Todavia, no contexto de monitoramento hidrometeorológico brasileiro, essa região apresenta baixa densidade de estações meteorológicas e fluviométricas. Dessa forma, o presente estudo avalia se há melhorias no desempenho do modelo SWAT, por meio da abordagem de calibração multivariável, integrando dados observados de vazão líquida e estimativas de evapotranspiração de referência derivadas de dados de estação meteorológica e de sensoriamento remoto. Por fim, esse trabalho contribui para a compreensão de uma das maiores dificuldades dos estudos hidroambientais, associada à evapotranspiração real (para diferentes tipos de cobertura do solo) em grandes áreas espaciais, como bacias hidrográficas.

Além disso, a compreensão da dinâmica hidrológica de bacias hidrográficas contribui diretamente para o cumprimento do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 15, que trata da conservação e do uso sustentável dos ecossistemas terrestres. De forma indireta, esse entendimento também se relaciona com o ODS 6, voltado à garantia da segurança hídrica, do acesso à água potável e ao saneamento básico, e com o ODS 3, que visa assegurar a saúde e o bem-estar da população. Conhecer o meio físico e compreender seu funcionamento favorece uma gestão mais eficiente da segurança ambiental e dos recursos hídricos, o que se reflete positivamente em aspectos fundamentais para a qualidade de vida e o bem-estar das pessoas.

4.2. Material e métodos

A bacia hidrográfica (BH) do rio Peixoto de Azevedo tem aproximadamente 19.452 km² e está localizada na região sul do bioma Amazônia, no norte do estado de Mato Grosso, entre as latitudes 9° 8' 22,9" e 11° 2' 8,2" S e as longitudes 53° 58' 0,7" e 55° 33' 26,4" W (Figura 21), com altitude variando entre 234 e 684 m.

Figura 21. Localização da bacia hidrográfica do rio Peixoto de Azevedo, assim como da estação meteorológica automática (EMA) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).



A bacia está localizada na província amazônica (IBGE, 1998), em região geomorfológica bastante antiga de crátons da era neoproterozóica (IBGE, 2022). O clima é do tipo Am (tropical de monção), conforme classificação de Köppen, a temperatura do ar média é de 24,6 °C e pluviosidade média anual de 1.814,9 mm, apresentando estação seca (maio a setembro) e estação chuvosa (outubro a abril) (Souza et al., 2013).

4.2.1. Modelagem hidrológica

Para a modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do rio Peixoto de Azevedo, empregou-se o modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT). Trata-se de um modelo de base física e de caráter semidistribuído, que opera em tempo contínuo, permitindo simulações em diferentes escalas temporais. A estrutura conceitual do SWAT divide a bacia hidrográfica em sub-bacias, que são segmentadas em unidades de paisagem, correspondentes às áreas de planície de inundação e de terras altas. E, posteriormente, subdivididas em Unidades de Resposta Hidrológica (Hydrological Response Units – HRUs), que constituem as menores unidades de cálculo do modelo. As HRUs representam combinações espacialmente

homogêneas de uso e cobertura da terra, tipo de solo e declividade, o que permite uma representação mais detalhada da variabilidade espacial e dos processos hidrológicos.

A simulação hidrológica no SWAT é organizada em duas etapas principais: a fase terrestre e a fase de propagação, também denominada fase de canal. A fase terrestre descreve o funcionamento do ciclo hidrológico em cada HRU, abrangendo processos como precipitação, escoamento superficial, infiltração e evapotranspiração, que são quantificados com base na equação do balanço hídrico. Os volumes de água gerados nessa etapa são, então, encaminhados para a fase de propagação, responsável por simular o transporte e a dinâmica da água, dos sedimentos, dos nutrientes e dos pesticidas ao longo da rede de drenagem, até o exutório da bacia hidrográfica. Tal processo é calculado aplicando a equação (Eq. 1) de balanço hídrico (Neitsch; Arnold; Williams, 2011):

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

Em que, SW_t é o armazenamento de água no solo no tempo t (mm); SW_0 é a umidade do solo inicial no dia i (mm); t é o tempo (dias); R_{day} é a precipitação no dia i (mm); Q_{surf} é o escoamento superficial no dia i (mm); E_a é a evapotranspiração no dia i (mm); W_{seep} é a percolação no dia i (mm) e Q_{gw} é o escoamento de retorno no dia i (mm).

A complexidade estrutural do modelo SWAT, decorrente de sua abordagem de base física e da capacidade de integrar múltiplos processos que atuam na bacia hidrográfica, implica a necessidade de um conjunto amplo e diversificado de variáveis de entrada. Estas incluem dados climáticos, tipos de solo e suas propriedades físicas e hidráulicas, uso e cobertura da terra e topografia. O resumo do conjunto de dados utilizado neste trabalho pode ser verificado na Tabela 7, e mais informações sobre ele serão apresentadas nos próximos tópicos.

Tabela 7. Conjunto de dados de entrada para a modelagem da bacia hidrográfica do rio Peixoto de Azevedo.

Variáveis de entrada	Fonte
Modelo digital de terreno (MDT) (Figura 22)	ANADEM
Tipo de solo (Figura 23)	IBGE
Uso e cobertura da terra (Figura 24)	MapBiomias
Características dos solos (Tabela 15)	EMBRAPA e pedotransferência
Características de uso e cobertura da terra	Padrão do SWAT
Dados climáticos	INMET

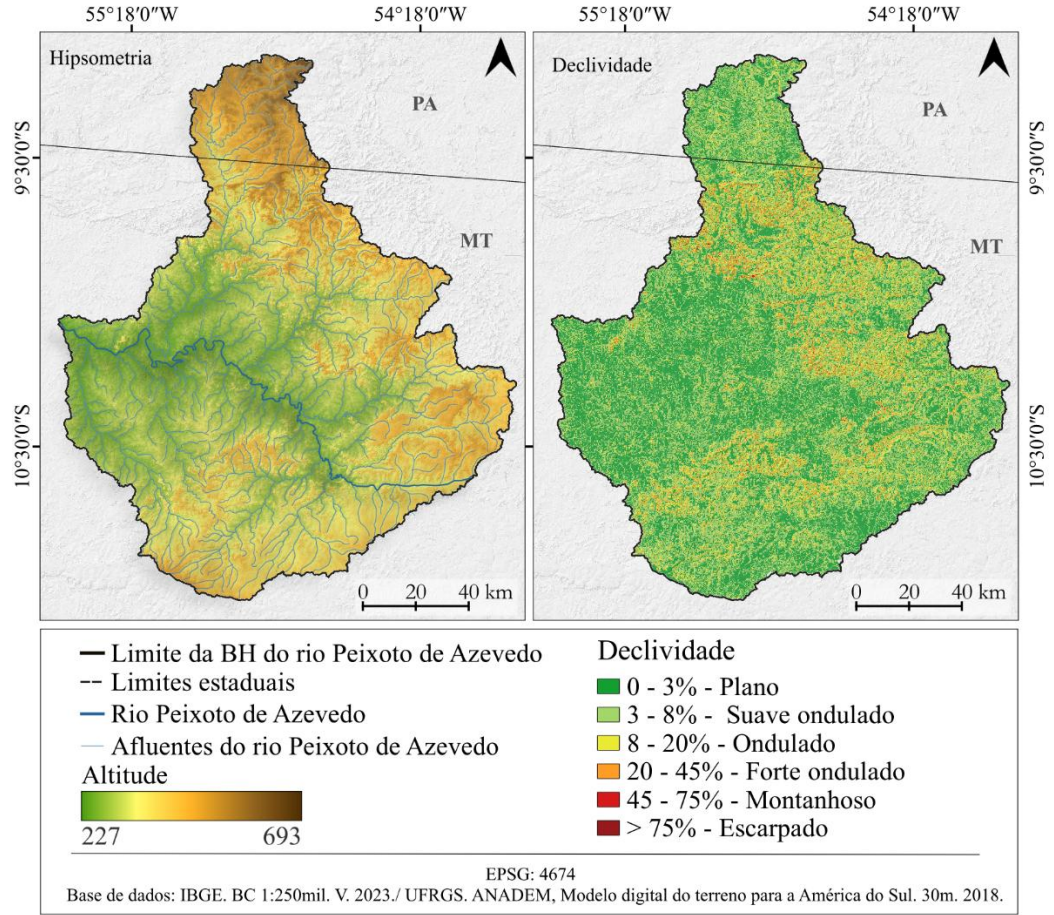
4.2.1.1. Modelo Digital de Terreno (MDT)

O MDT utilizado nesta pesquisa foi o Modelo Digital de Terreno para a América do Sul (ANADEM), com resolução espacial de 30 m, desenvolvido pela parceria entre a Universidade

Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) para o continente sul-americano. Este produto é gerado a partir do modelo digital de elevação (MDE) Copernicus GLO-30, submetido a um processo de filtragem para remover a vegetação, resultando em uma representação mais fiel da superfície topográfica do terreno (Laipelt et al., 2024).

No modelo SWAT+, o MDT é utilizado para definir a estrutura física da bacia hidrográfica, delimitando automaticamente a rede de drenagem, as sub-bacias, as unidades de paisagem (áreas de várzea) e as unidades de resposta hidrológica (HRUs) com base na declividade do terreno. Para a classificação da declividade, adotou-se a sistematização proposta pela Embrapa (1979), com as seguintes classes: 0-3%, 3-8%, 8-20%, 20-45%, 45-75% e >75% (Figura 22).

Figura 22. Mapa hipsométrico (à esquerda) e mapa de declividade (à direita), da bacia hidrográfica do rio Peixoto de Azevedo.



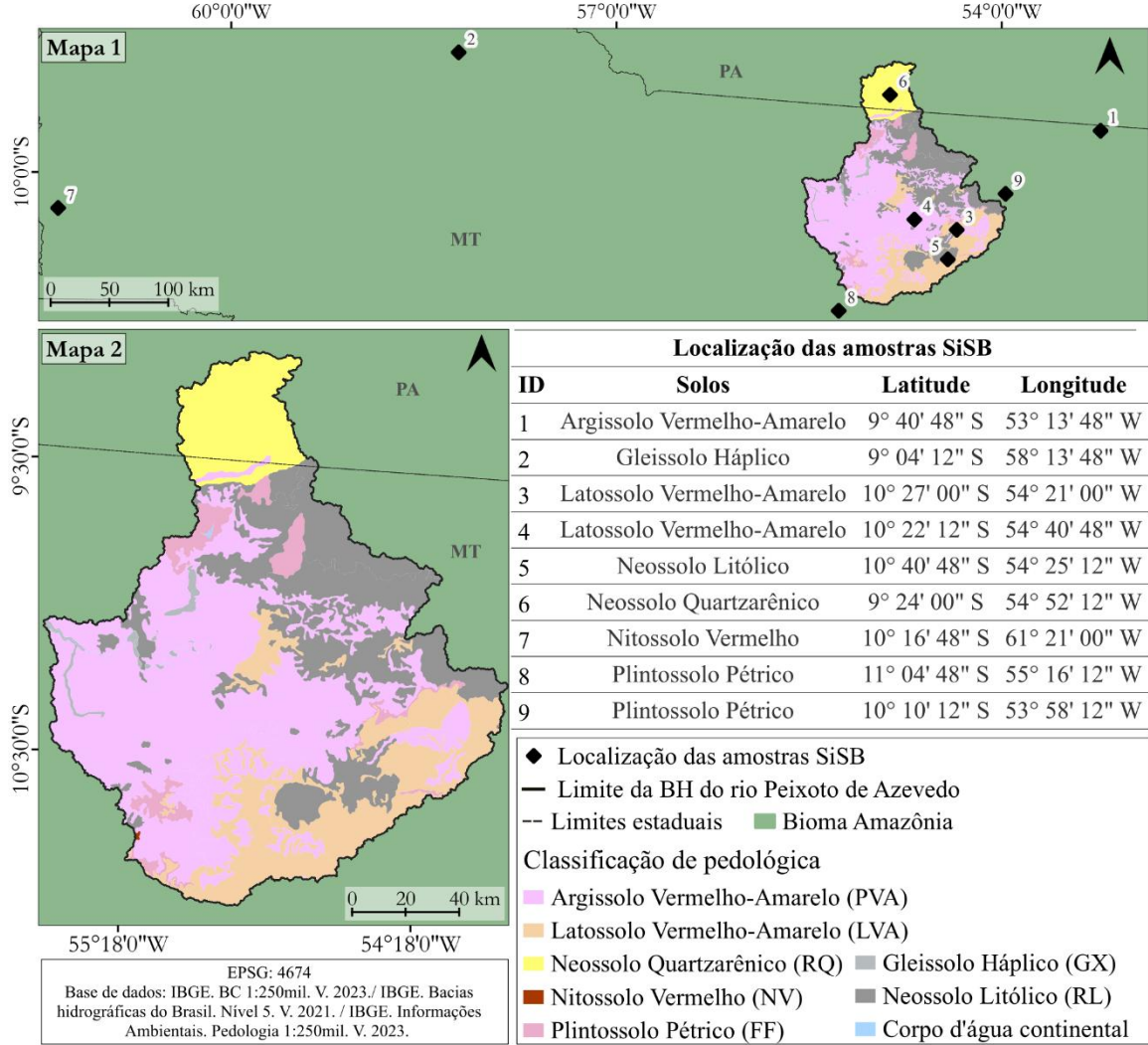
4.2.1.2. Pedologia

O modelo SWAT exige a entrada de dados espacializados sobre os solos da bacia, sendo utilizada a base de dados vetorial do tipo shapefile disponibilizada pela base de dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), com resolução espacial de 1:250.000 (IBGE, 2023). Também exige informações sobre as propriedades físico-hídricas dos solos. O modelo SWAT disponibiliza uma base de dados com informações genéricas do Soil Survey Geographic Database (SSURGO), baseadas em solos norte-americanos, que podem ser personalizadas e substituídas por informações específicas da área de estudo.

Para este trabalho, os parâmetros dos solos foram personalizados com base nas características observadas na área de estudo. Para tanto, primeiramente, baseada na classificação pedológica do IBGE, foram identificados os tipos de solo da bacia do rio Peixoto de Azevedo. A partir dessa informação, buscaram-se amostras de perfis de solo disponibilizados pelo Sistema de Informação de Solos Brasileiros (SiSB) da Embrapa (Figura 23).

Nem todos os solos apresentaram amostragens de perfil dentro dos limites da BH do rio Peixoto de Azevedo. Desta forma, foram realizadas buscas por amostras pedológicas em regiões com características climáticas semelhantes.

Figura 23. Localização das amostras de perfil de solos do Sistema de Informação de Solos Brasileiros (SiSB) da Embrapa (Mapa 1) e espacialização dos solos na BH do rio Peixoto de Azevedo (Mapa 2).



Para estimar os parâmetros exigidos no modelo (Tabela 8), foram utilizados dados diretos obtidos a partir de amostras de perfis de solo, bem como métodos de pedotransferência. Quando foram encontradas duas amostras dentro da bacia, como no caso do Latossolo Vermelho-Amarelo, foi calculada a média dos parâmetros utilizados.

Tabela 8. Parâmetros pedológicos exigidos pelo modelo SWAT.

Parâmetro	Descrição	Parâmetro	Descrição
OBJECTID	Código relacionado com o dado espacializado	SOL_K ¹	Condutividade hidráulica
SNAM	Sigla para o tipo de solo	SOL_CBN ¹	Carbono orgânico
HYDGRP	Grupo hidrológico	CLAY ¹	Argila
NLAYERS	Número de camadas do perfil	SILT ¹	Silte
SOL_ZMX	Profundidade do perfil do solo (mm)	SAND ¹	Areia
ANION_EXCL	Porosidade do solo	ROCK ¹	Seixo
TEXTURE	Textura do solo	SOL_ALB ¹	Albedo do solo úmido
SOL_Z ¹	Profundidade de cada horizonte (mm)	USLE_K ¹	Erodibilidade
SOL_BD ¹	Densidade aparente	SOL_EC ¹	Condutividade elétrica
SOL_AWC ¹	Armazenamento de água no solo		

¹Parâmetros são exigidos para cada horizonte relatado no perfil do solo.

Os parâmetros diretos encontrados nas amostras são: número de camadas (NLAYERS); profundidade do perfil do solo (SOL_ZMX); profundidade de cada horizonte (SOL_Z); carbono orgânico (SOL_K); argila (CLAY); silte (SILT); areia (SAND) e seixo (ROCK).

A variável HYDGRP refere-se ao código do grupo hidrológico do solo, conforme classificação estabelecida pelo United States Department of Agriculture/Natural Resources Conservation Service (USDA/NRCS) (USDA/NRCS, 2009). Essa classificação categoriza os solos em quatro grupos distintos (A, B, C e D) com base no potencial de geração de escoamento superficial, considerando características como textura, estrutura, condutividade hidráulica e presença de camadas impermeáveis. Para este trabalho, consideramos as características de textura.

O parâmetro ANION_EXCL, referente à porosidade do solo, foi estimado dividindo-se a densidade aparente pela densidade das partículas, considerando-se a média de $2,65 \text{ g cm}^{-3}$, conforme Saxton; Rawls (2006).

E a densidade aparente (SOL_BD) foi calculada conforme Benites et al. (2007). Apesar de, no trabalho, os autores terem indicado a fórmula 5 como a que apresentou melhores resultados estatísticos, foi utilizada a fórmula 6 (Eq. 2), pois a fórmula 5 exigia dados de soma de cátions básicos e nem todas as amostras de perfil encontradas disponibilizavam essa informação.

$$D_b = 1,56 (-0,0005 * \text{Argila}) - (0,009 * CO) \quad \text{Eq. 2}$$

Em que: D_b é a densidade aparente do solo (g cm^{-3}); *Argila* é o percentual de argila (%) e *CO* é o teor de carbono orgânico (%).

Para a textura do solo (TEXTURE), foi utilizado o triângulo textural (USDA/NRCS, [s/d]), no entanto, o SWAT exige que se utilize a nomenclatura em inglês: Clay; Sandy Loam; Loam; Silty Loam; Sandy Clay Loam; Silty Clay; Sand; Clay Loam.

Para SOL_AWC, que se refere ao armazenamento de água no solo, foi considerada a capacidade de água disponível (CAD) média para os diferentes tipos de solo: $2,0 \text{ mm cm}^{-1}$ para solos argilosos, $1,4 \text{ mm cm}^{-1}$ para solos de textura média e $0,6 \text{ mm cm}^{-1}$ para solos arenosos. Foram considerados solos argilosos, com mais de 45% de argila; solos médios, com 20 a 45% de argila; e solos arenosos, com menos de 20% de argila.

Para a condutividade hidráulica foi utilizada a metodologia proposta por (Saxton; Rawls, 2006) (Eq. 3 a Eq. 9):

$$K_s = 4632 (\theta_s - \theta_{33})^{(3 - \lambda)} \quad \text{Eq. 3}$$

$$\theta_s = \theta_{33} - 0,064 - 0,00097 * S + 1,636 (0,00278 * S + 0,00034 * C + 0,0128 * OC - 0,000104 * S * OC - 0,000157 * C * OC - 0,0000584 * S * C + 0,078) \quad \text{Eq. 4}$$

$$\lambda = [\ln(\theta_{33}) - \ln(\theta_{1500})] / [\ln(1500) - \ln(33)] \quad \text{Eq. 5}$$

$$0,015\theta_{33} = \beta + (1,283 * \beta^2 - 0,374 * \beta - 0,015) \quad \text{Eq. 6}$$

$$\beta = -0,00251 * S + 0,00195 * C + 0,0064 * OC + 0,000035 * S * OC - 0,00016 * C * OC + 0,0000452 * S * C + 0,299 \quad \text{Eq. 7}$$

$$\theta_{1500} = \lambda + (0,14 * \gamma - 0,02) \quad \text{Eq. 8}$$

$$\gamma = 0,00024 * S + 0,00487 * C + 0,0035 * OC + 0,00029 * S * OC - 0,0000756 * C * OC + 0,0000068 * S * C + 0,031 \quad \text{Eq. 9}$$

Em que: K_s é a condutividade hidráulica (cm dia^{-1}); θ_s é umidade saturada; θ_{33} Conteúdo de água na capacidade de campo; θ_{1500} é o conteúdo de água do solo no ponto de murcha; C é o teor de argila (%); S é o teor de areia (%); OC é o teor de carbono orgânico (%); β parâmetro de forma da curva de retenção; λ Inclinação da curva logarítmica de tensão-umidade e γ é expoente da condutividade hidráulica.

Para o parâmetro USLE_K, referente à erodibilidade do solo (K), foi utilizada a metodologia de Bouyoucos (1935) (Eq. 10):

$$K = \frac{\% \text{ Areia} + \% \text{ Silte}}{\% \text{ argila}} * \frac{1}{100} \quad \text{Eq. 10}$$

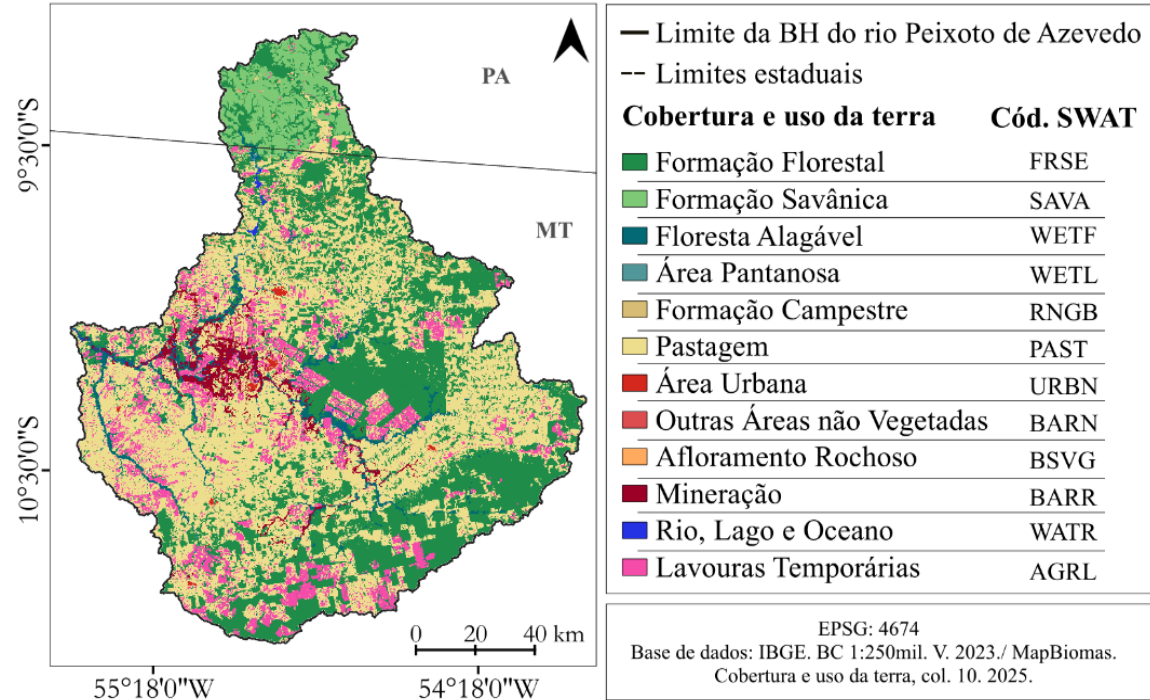
Para o albedo do solo úmido (SOL_ALB), com base em valores publicados em trabalhos científicos (Gascoin et al., 2009; Silva et al., 2010; Novais et al., 2016; He et al., 2019), considerou-se o valor médio de 0,13 para todos os horizontes do solo.

A condutividade elétrica também é um parâmetro que deve ser preenchido; no entanto, devido à falta de dados, foi atribuído o valor zero (0).

4.2.1.3. Cobertura e uso da terra

Para a representar o uso e da cobertura da terra na modelagem, utilizou-se o produto "Cobertura e Uso da Terra" da Coleção 10 do MapBiomas, referente ao ano de 2024 (MapBiomas, 2025). No processo de configuração do modelo SWAT, é necessário associar cada classe de uso do solo identificada a um código específico de parâmetros hidrológicos. Para isso, pode-se optar por duas abordagens: (1) a construção personalizada de uma tabela de parâmetros com base nas características locais, ou (2) a utilização da base de dados padrão fornecida pelo modelo hidrológica, realizando o cruzamento entre a legenda do MapBiomas e a classificação nativa do SWAT; a segunda opção foi a adotada (Figura 24).

Figura 24. Mapa de cobertura e uso da terra da bacia hidrográfica do rio Peixoto de Azevedo, com códigos para o processamento desse dado no SWAT.



Ressalta-se que a formação savânica, presente apenas na região norte da bacia (Figura 23), está associada à área de maior altitude do planalto da Serra do Cachimbo (Figura 22). As condições geomorfológicas da área influenciam as características do solo e, consequentemente, as características vegetacionais (Lleras; Kirkbride Jr., 1978).

4.2.1.4.Dados climáticos

Os dados climáticos diários necessários para a modelagem SWAT (precipitação, temperaturas máximas e mínimas, radiação solar, umidade relativa e velocidade do vento) foram obtidos da estação meteorológica automática A906 (Figura 21), operada pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

As variáveis meteorológicas diárias, para o período de 2011 a 2023, foram aplicadas em dois contextos na parametrização do gerador climático (WGN) e, no caso das variáveis precipitação, temperatura máxima e mínima e radiação solar, foram utilizados como dados observados na bacia hidrográfica. Os dados observados foram submetidos à análise de consistência para identificar possíveis erros de registro e eventuais falhas.

O preenchimento das falhas das variáveis de precipitação, temperaturas máximas e mínimas foi realizado com base nos dados derivados do Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) (Da Silva et al., 2021; Cordeiro; Blanco, 2021). Inicialmente, calculou-se a média dos dados de precipitação das quatro estações de grade do TRMM (códigos: 5436, 5296, 5297 e

5435) mais próximas da estação avaliada. Os dados, tanto da estação de superfície quanto da média do TRMM, foram estratificados em dois regimes sazonais distintos: o período seco (de maio a setembro) e o período chuvoso (de outubro a abril). Para cada regime, quantificou-se o viés sistemático por meio do cálculo do desvio médio entre os dados observados e a média da TRMM. Por fim, o preenchimento dos dados faltantes foi realizado ajustando a média do TRMM correspondente à data da falha pelo desvio característico do período sazonal.

E as falhas na variável radiação solar diária foram preenchidas por meio da aplicação da fórmula de Bristow; Campbell (1984; Eq. 11 a Eq. 24), empregando coeficientes calibrados para a estação A906 (Souza et al., 2017).

$$H_G = a (1 - \exp(-b\Delta T^c))H_0 \quad \text{Eq. 11}$$

$$H_0 = 37,59 * dr * [\omega_s * \text{sen}(\varphi) * \text{sen}(\delta) + \cos(\varphi) * \cos(\delta) * \text{sen}(\omega_s)] \quad \text{Eq. 12}$$

$$dr = 1 + 0,033 * \cos\left(\frac{360 * DJ}{365}\right) \quad \text{Eq. 13}$$

$$\delta = 23,45 * \text{sen}\left[\frac{360}{365} * (DJ + 284)\right] \quad \text{Eq. 14}$$

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan\varphi * \tan\delta) \quad \text{Eq. 15}$$

Em que: H_G é a radiação global diária ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), a , b e c são coeficientes parametrizados (0,558, 0,017 e 1,976 respectivamente (Souza et al., 2017)), ΔT é a amplitude térmica ($^{\circ}\text{C}$), H_0 é a radiação solar global diária na superfície horizontal ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), ω_s é o ângulo horário ao nascer do sol (rad), φ latitude local (rad), δ é a declinação solar (rad), dr é a distância Terra-Sol e DJ é dia juliano.

O dado de evapotranspiração de referência (ET_0) foi utilizado na calibração do modelo; para tanto, o método de Penman-Monteith parametrizado pela FAO 56 (Eq. 16), calculado com base nos dados da estação meteorológica A906, foi considerado o dado observado, ao passo de tempo diário.

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(Rn - G) + \gamma \frac{900}{T_{méd} + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad \text{Eq. 16}$$

Em que: ET_0 é a evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}); Δ é a declividade da curva da pressão de vapor vs. temperatura ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$); Rn é a radiação líquida ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); G é o fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); $T_{méd}$ é a média diária da temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$); u_2 é a velocidade do vento (m s^{-1}); e_s é a pressão da saturação de vapor (kPa); e_a é a pressão de vapor atual (kPa); e γ é a constante psicrométrica ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$).

Também foi testado o produto MOD16A2 no processo de calibração, devido à sua elevada aplicabilidade na região amazônica (Castagna et al., 2024). O produto MOD16A2 do

sensor MODIS a bordo do satélite TERRA, com resolução espacial de 500 m e resolução temporal de 8 dias (Running et al., 2021). O MOD16A2 apresenta resolução temporal de oito dias, no entanto, é o valor acumulado para oito dias. Dessa forma, os valores acumulados foram distribuídos ao longo dos sete dias subsequentes.

Também foi estimada a ET_0 utilizando os modelos de Camargo et al. (1999) (Eq. 17) e Hargraves; Samani (1985) (Eq. 18), considerando os dados da estação meteorológica.

$$ET_0 = F * H_o * T_{méd} \quad \text{Eq. 17}$$

$$ET_0 = 0,0023 * H_o * (T_{máx} - T_{mín})^{0,5} * (T_{méd} + 17,8) \quad \text{Eq. 18}$$

Em que: ET_0 é a evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}), F é o fator de correção do modelo, H_o é a radiação extraterrestre em equivalente de evaporação (mm dia^{-1}), $T_{máx}$ é a temperatura máxima ($^{\circ}\text{C}$), $T_{mín}$ é a temperatura mínima ($^{\circ}\text{C}$) e $T_{méd}$ é a temperatura média diária ($^{\circ}\text{C}$).

4.2.2. Dados de vazão

Para a estimativa da vazão líquida utilizada nos procedimentos de calibração e validação da simulação hidrológica da bacia hidrográfica do rio Peixoto de Azevedo, adotou-se a abordagem indireta de regionalização por área (Tucci, 2014), devido à inexistência de dados fluviométricos observados para o referido rio. Assim, foram utilizados registros de vazão líquida de duas estações fluviométricas, disponibilizados pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), referente ao período de 2013 a 2023: a estação 17340000, localizada a montante da foz, e a estação 17380000, situada a jusante da foz (Figura 25).

Primeiramente, determinou-se a contribuição hídrica líquida gerada no trecho entre as estações fluviométricas (Área 2). Para isso, subtraiu-se a vazão líquida observada na estação da jusante (17380000) da vazão registrada na estação montante (17340000). Essa diferença representa a vazão incremental proveniente exclusivamente das sub-bacias e dos afluentes da Área 2 (Figura 25; Eq. 19).

$$Q_{A2} = Q_{17380000} - Q_{17340000} \quad \text{Eq. 19}$$

Em que: Q_{A2} é a vazão líquida ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$), $Q_{17380000}$ é a vazão líquida ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) da estação fluviométrica 17380000 e $Q_{17340000}$ é a vazão líquida ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) da estação fluviométrica 17340000.

Posteriormente, a fim de permitir a transferência desses dados para áreas sem monitoramento direto, o valor de Q_{A2} foi normalizado pela sua respectiva área de contribuição, denominada Área 2, que possui $29.388,55 \text{ km}^2$ (Figura 25). O resultado desta etapa é a vazão líquida específica ($\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{km}^{-2}$) (Eq. 20).

$$q = \frac{Q_{A2}}{A_{A2}} \quad \text{Eq. 20}$$

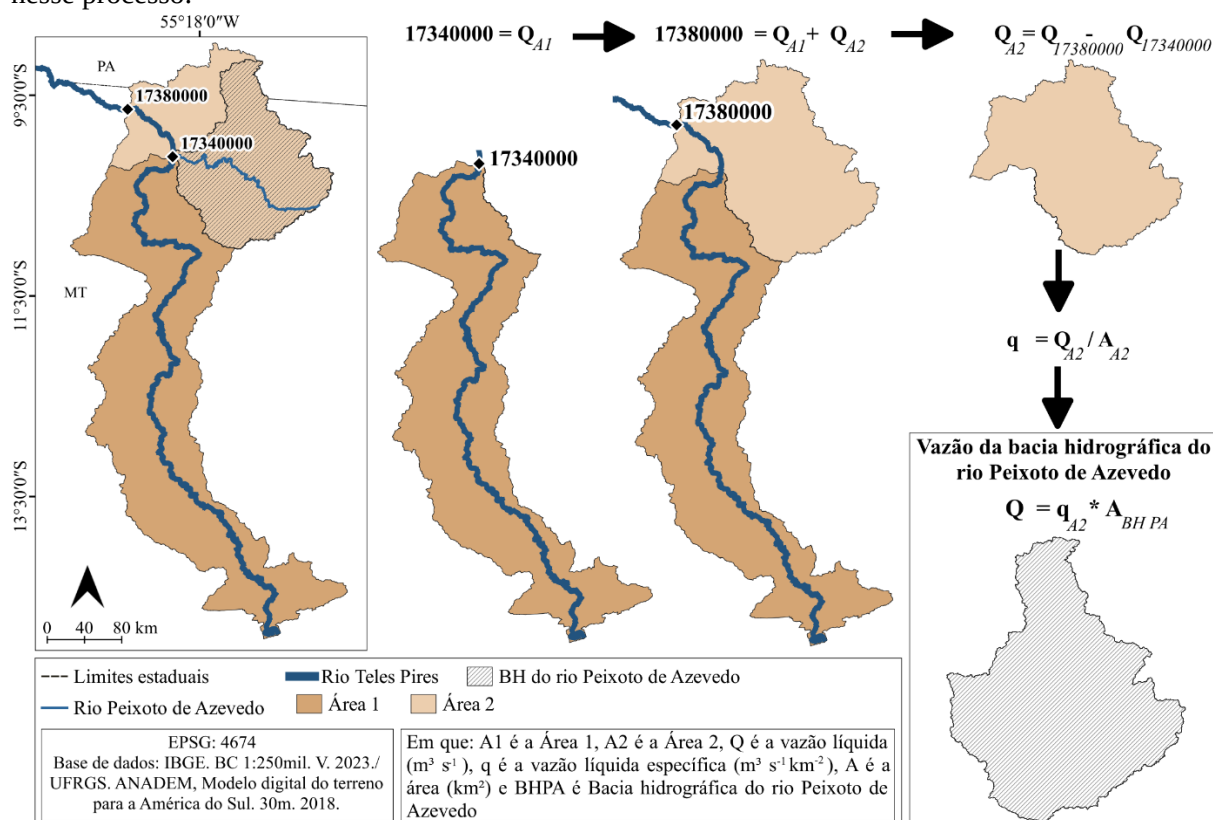
Em que: q é a vazão líquida específica ($\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{km}^{-2}$), Q_{A2} é a vazão líquida ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) da Área 2 e A_{A2} é a área da Área 2 (km^2).

A vazão líquida específica calculada foi multiplicada pela área total da bacia hidrográfica do rio Peixoto de Azevedo ($19.452,33 \text{ km}^2$), resultando na estimativa da vazão líquida média da bacia utilizada na etapa de calibração do modelo (Figura 25) (Eq. 21).

$$Q = q * A_{BHPA} \quad \text{Eq. 21}$$

Em que: Q é a vazão líquida ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$), q é a vazão líquida específica ($\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{km}^{-2}$), A_{BHPA} é a área da bacia hidrográfica do rio Peixoto de Azevedo (km^2).

Figura 25. Localização das estações fluviométricas utilizadas para a estimativa da vazão líquida na bacia hidrográfica do rio Peixoto de Azevedo e fluxograma da metodologia de regionalização empregada nesse processo.



4.2.3. Desempenho estatístico

O desempenho estatístico foi quantificado por meio do seguinte conjunto de métricas estatísticas: o erro absoluto médio (MBE - Mean bias error) (Eq. 22), raiz quadrada média do

erro (RMSE - Root mean square error) (Eq. 23) e Índice de Concordância de Willmott (d) (Eq. 24):

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^N (Pi - Oi)}{N} \quad \text{Eq. 22}$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (Pi - Oi)^2}{N} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{Eq. 23}$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Pi - Oi)^2}{\sum_{i=1}^N (|P'i| + |O'i|)^2} \quad \text{Eq. 24}$$

Em que: N é o número de observações, Pi são os valores estimados e Oi os valores medidos, $|P'i|$ é o valor absoluto da diferença $Pi - \overline{O_i}$, $|O'i|$ é o valor absoluto da diferença $Oi - \overline{O_i}$.

O MBE quantifica o desvio sistemático médio, em que valores positivos indicam superestimação, negativos, subestimação e 0 representa uma simulação perfeita. Complementarmente, o RMSE mensura o espalhamento absoluto dos erros, sendo que valores mais próximos de zero indicam maior precisão; contudo, não discrimina a direção do viés. O Índice de Concordância de Willmott (d) avalia o grau de ajuste entre as séries estimadas e observadas, variando de 0 (nenhuma concordância) a 1 (concordância perfeita).

O desempenho estatístico foi aplicado à evapotranspiração e à vazão. A avaliação do desempenho dos métodos de estimativa da evapotranspiração foi realizada por meio da comparação com a série de referência, considerando-se o valor observado. A série de referência foi obtida pelo método de Penman-Monteith, com base em dados medidos in situ pela estação meteorológica automática de Guarantã do Norte (código A906). As estimativas provenientes dos demais métodos foram, portanto, tratadas como valores estimados.

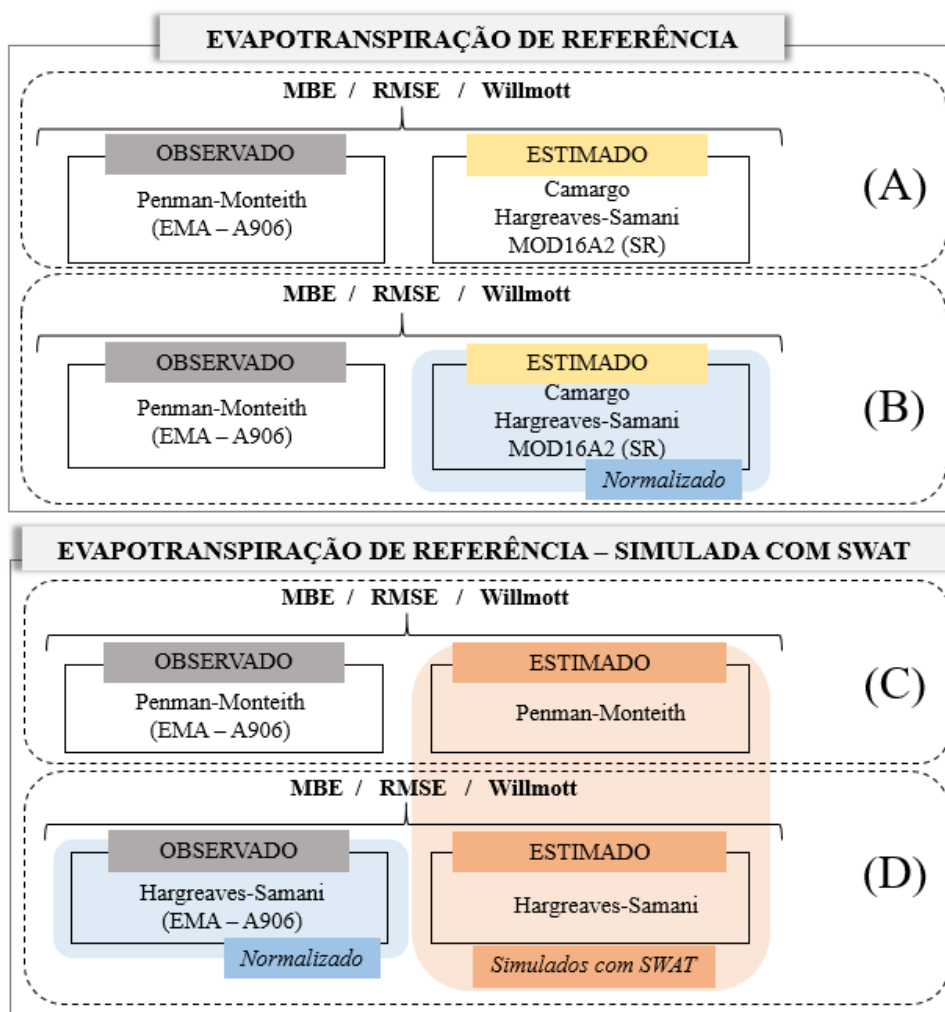
O desempenho estatístico foi verificado entre o método de Penman-Monteith e os métodos de Camargo e Hargreaves-Samani, considerando as variáveis disponíveis na estação meteorológica A906, e entre o método de Penman-Monteith e o produto MOD16A2 (Figura 26 (A)).

O resultado do MBE entre os valores observados pelo método de Penman-Monteith e estimados pelos métodos de Camargo, Hargreaves-Samani e MOD16A2 foi aplicado às suas respectivas estimativas, resultando em métodos com valores normalizados e então foi verificado novamente o desempenho estatístico (Figura 26 (B)).

Os indicadores estatísticos também foram utilizados na avaliação do desempenho do modelo SWAT, comparando-se diretamente os valores simulados aos observados, sem calibração prévia nem ajuste de parâmetros. Essa análise considerou a evapotranspiração

potencial (ET_0) dos modelos de Penman-Monteith (Figura 26 (C)) e Hargreaves-Samani (Figura 26 (D)), estimada pelo modelo, em relação aos mesmos modelos de ET_0 calculados pela Estação Meteorológica Automática (EMA) A906.

Figura 26. Esquema de aplicação dos indicadores estatísticos para a evapotranspiração de referência ET_0 .

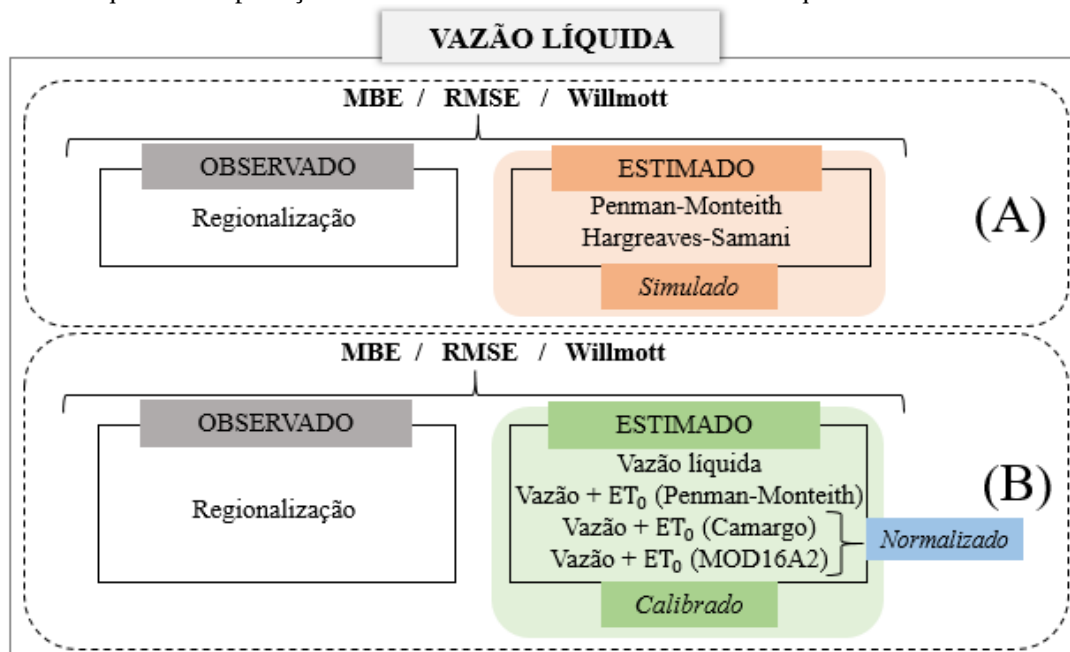


Para a vazão líquida, os indicadores estatísticos foram aplicados considerando o dado de vazão obtido pelo método de regionalização como variável observada e, como variável estimada, os resultados da simulação no modelo SWAT, com dois cenários: um em que o ET_0 foi o modelo de Penman-Monteith e, no outro, o ET_0 foi o modelo de Hargreaves-Samani (Figura 27 (A)).

Os indicadores estatísticos MBE, RMSE e o Índice de Concordância de Willmott também foram aplicados aos dados de vazão líquida pós-calibração da simulação. Para tanto, foi considerada a vazão obtida pela regionalização como variável observada, e, como variáveis estimadas, foram consideradas: (i) calibração realizada apenas com o dado de vazão; (ii) calibração com vazão e ET_0 pelo modelo de Penman-Monteith; (iii) calibração com vazão e

ET₀ pelo modelo de Camargo; e (iv) calibração com vazão e ET₀ do produto MOD16A2 (Figura 27B).

Figura 27. Esquema de aplicação dos indicadores estatísticos da vazão líquida.



4.2.4. Análise de sensibilidade e calibração

Para a análise de sensibilidade e a calibração, utilizou-se o SWAT+ Toolbox. As simulações foram conduzidas em escala temporal mensal, abrangendo o período de 2011 a 2020, adotando-se os três primeiros anos (2011–2013) como período de aquecimento do modelo, a fim de minimizar a influência das condições iniciais nos resultados (Figura 28).

Para a propagação da vazão líquida na rede de drenagem foi adotado o método de Armazenamento Variável (*Variable Storage Method*). A escolha de que a sensibilidade e a calibração tenham sido processadas na escala temporal mensal. Nessa resolução temporal, os picos de cheia são naturalmente amortecidos pelo processo de agregação dos dados, tornando menos relevante a representação detalhada da propagação da onda de cheia. Assim, o método de Armazenamento Variável mostra-se adequado por representar o balanço entre entrada, saída e armazenamento no canal, preservando a coerência hidrológica do sistema sem introduzir complexidade adicional desnecessária à escala analisada (Neitsch et al., 2011).

A análise de sensibilidade global foi realizada por meio do método de Sobol (Sobol', 2001), aplicado à função objetivo Kling-Gupta Efficiency (KGE), tendo a série de vazão observada ao longo do tempo mensal como referência para a avaliação do desempenho do modelo (Jiménez-Navarro; Pierson; Senent-Aparicio, 2024; Cecconello et al., 2025) (Figura

28). Nesse contexto, a variância da métrica de desempenho foi decomposta em parcelas atribuídas aos efeitos individuais (índices de primeira ordem) e aos efeitos totais dos parâmetros, incluindo suas interações. Assim, os índices de sensibilidade estimados expressam a contribuição relativa de cada parâmetro para a variabilidade do desempenho hidrológico, permitindo identificar aqueles que exercem maior influência sobre a qualidade do ajuste entre as vazões líquidas simuladas e observadas.

Para a análise de sensibilidade, foram avaliados 15 parâmetros (Tabela 9), cujos limites mínimos e máximos foram previamente definidos, bem como os respectivos tipos de alteração (relativa, absoluta ou substituição). A seleção dos parâmetros, a definição dos intervalos de variação e os métodos de alteração adotados fundamentaram-se em referências bibliográficas especializadas (Lopes et al., 2021; Jiménez-Navarro; Pierson; Senent-Aparicio, 2024; Cecconello et al., 2025). Foram consideradas 200 amostras na geração das sequências de Sobol, o que resultou em 6.400 execuções do modelo para estimar os índices de sensibilidade (Figura 28).

Tabela 9. Parâmetros utilizados na análise de sensibilidade da vazão líquida observada na bacia hidrográfica do rio Peixoto de Azevedo.

Parâmetro	Descrição	Limites		Tipo de alteração ¹
		Mín	Máx.	
CHK.rte	Condutividade hidráulica efetiva no canal (mm hr^{-1})	1,0	150	Substituir
PETCO.hru	Fator de compensação da evapotranspiração potencial das plantas (%).	0,7	1,2	Substituir
REVAP_CO.aqu	Controle da transferência de água do aquífero raso para a zona de raízes (adimensional).	0	0,2	Substituir
ESCO.hru	Fator de compensação da evaporação do solo (adimensional).	0,01	0,9	Substituir
ALPHA.aqu	Fator de recessão do fluxo de base (dias^{-1})	0,01	0,9	Substituir
CANMX.hru	Interceptação máxima de água pelo dossel vegetal (mm)	0	10	Substituir
EPCO.hru	Fator de compensação de absorção pelas plantas (adimensional)	0,01	1,0	Substituir
FLO_MIN.aqu	Vazão mínima que o aquífero precisa ter para liberar água para o curso d'água (m)	-25	50	Relativo
SURLAG.bsn	Coefficiente de atraso do escoamento superficial (dias)	-15	15	Percentual
CN2.hru	Curva Número inicial para a condição de umidade AMC II (adimensional)	-25	25	Percentual
PERCO.hru	Coefficiente de percolação (adimensional)	0	2,0	Substituir
LATQ_CO.hru	Fator de defasagem do fluxo lateral	0	1	Substituir
K.sol	Condutividade hidráulica do solo saturado (mm h^{-1})	-10	10	Percentual
REVAP_MIN.aqu	Limiar de profundidade da água no aquífero raso para que ocorra percolação para o aquífero profundo (mm)	0	10	Substituir
OVN.hru	Coefficiente de Manning para fluxo terrestre (adimensional).	-20	20	Percentual

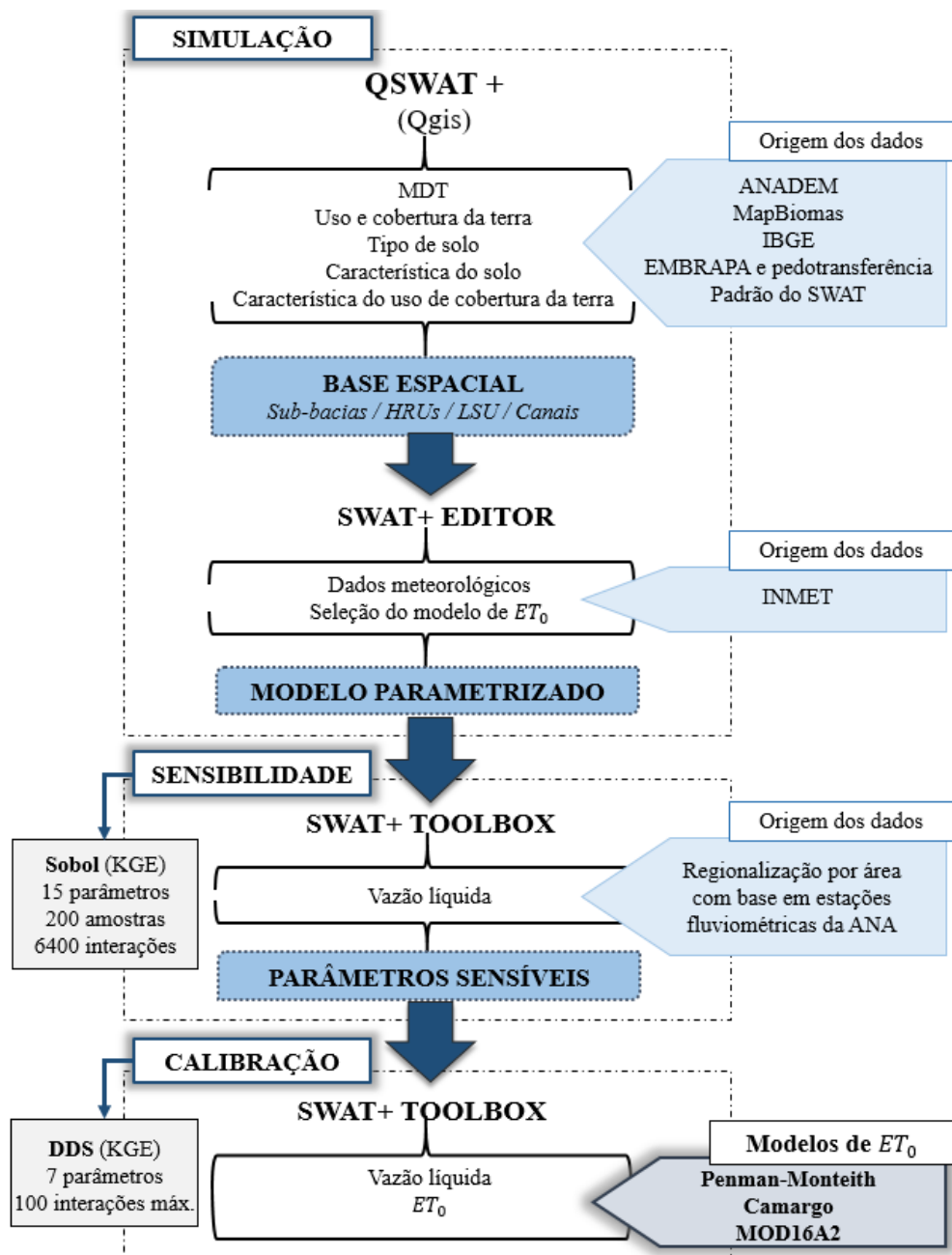
¹O SWAT+ Toolbox disponibiliza três tipos de alteração dos parâmetros: Substituir, onde o valor original é integralmente substituído por um novo valor dentro do intervalo determinado; Percentual, que aplica uma variação multiplicativa em relação ao valor original, preservando a proporcionalidade e, conseqüentemente, a heterogeneidade espacial dos parâmetros distribuídos na

bacia; e Relativo, que realiza uma modificação aditiva, pela soma ou subtração de incremento ao valor de referência do modelo.

Após a identificação dos parâmetros sensíveis à variabilidade da vazão na bacia do rio Peixoto de Azevedo, realizou-se a calibração com o algoritmo Dynamically Dimensioned Search (DDS) (Tolson; Shoemaker, 2007), um método de otimização estocástica que ajusta os parâmetros de forma probabilística ao longo das iterações, iniciando com uma busca mais ampla no espaço paramétrico e evoluindo gradualmente para ajustes mais refinados. O algoritmo busca maximizar a função objetivo Kling-Gupta Efficiency (KGE), mantendo apenas as soluções que apresentam melhoria em relação ao melhor resultado obtido, até o limite de 100 iterações (Figura 28).

O mesmo processo de calibração foi realizado quatro vezes, considerando a variabilidade dos dados observados ao longo de um período mensal: (i) calibração apenas com a vazão como dado observado; (ii) calibração multivariada, com vazão e ET_0 com o modelo de Penman-Monteith; (iii) calibração multivariada, com vazão e ET_0 com o modelo de Camargo; (iv) calibração multivariada, com vazão e ET_0 do MOD16A2 (dado de sensoriamento remoto) (Figura 28).

Figura 28. Fluxograma do processo de simulação e calibração do modelo SWAT utilizado neste trabalho.



4.3. Resultados

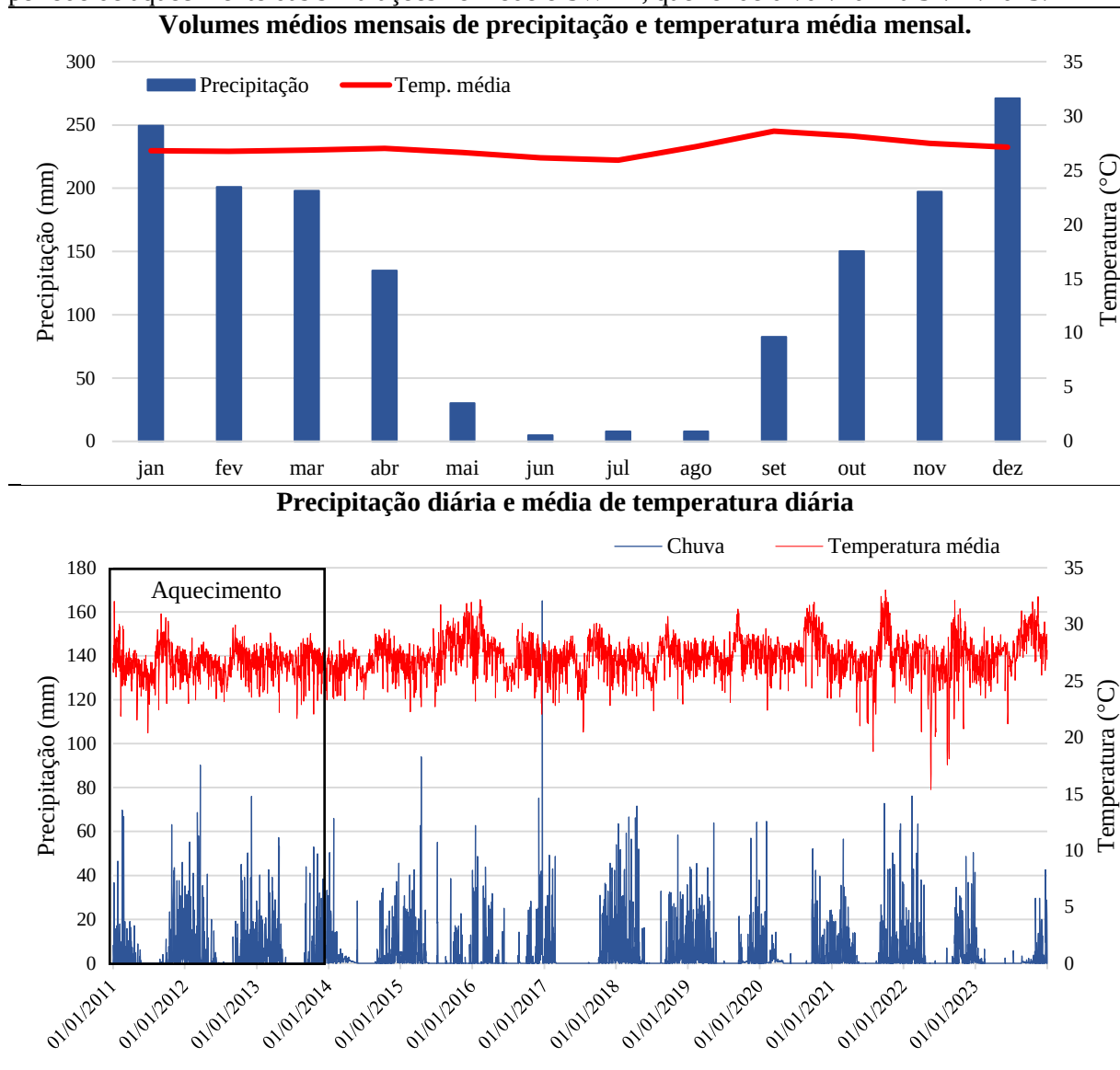
4.3.1. Características climáticas

De acordo com os dados da estação meteorológica A906, localizada na bacia hidrográfica do rio Peixoto de Azevedo, a temperatura média anual é de $27,1 \pm 1,5$ °C. As temperaturas máximas atingem até 36,1 °C em setembro, enquanto a mínima registrada é de 17,3 °C em julho (Figura 29 e Tabela 10). Esse comportamento térmico está associado às incursões ocasionais de massas de ar frio provenientes de altas latitudes do hemisfério sul, que

atingem a região durante o inverno austral e provocam as chamadas friagens, responsáveis por quedas temporárias da temperatura.

Os meses de maio, junho, julho, agosto e setembro, corresponde ao período de menor volume pluviométrico, o que resulta em redução da umidade relativa do ar. Essas condições favorecem o aumento da amplitude térmica diária, cujos valores médios variam entre 14,4 e 17,6 °C (Figura 29 e Tabela 10). Tal padrão evidencia a influência conjunta da sazonalidade das chuvas e da circulação atmosférica regional sobre o regime térmico da bacia.

Figura 29. Gráficos da temperatura do ar média e de precipitação mensal e dos valores diários com o período de aquecimento das simulações no modelo SWAT, que foi de 01/01/2011 a 31/12/2013.



Conforme observado, a distribuição anual de chuva caracteriza-se por dois períodos bem definidos: uma estação seca, de maio a agosto, e uma estação chuvosa, de setembro a abril

(Figura 29). Durante a estação seca também ocorre a maior incidência de radiação solar, especialmente em agosto e setembro, em decorrência da menor nebulosidade (Tabela 10). Esse período coincide com a transição do solstício de inverno para o equinócio de primavera no hemisfério sul. Considerando a latitude da bacia (entre 9° 8' 22,9" e 11° 2' 8,2" S), observa-se que, no final de setembro e no início de outubro, o Sol encontra-se próximo ao zênite nessa região, que, aliado aos baixos níveis de nebulosidade, resulta em elevada incidência de radiação solar.

Tabela 10. Resumo climático da estação meteorológica automática A906 no período de 2011 a 2023.

Mês	Temp. média máx. diária (°C)	Temp. média mín. diária (°C)	Radiação solar média diária (MJ/m²/dia)	Velocidade média diária (m/s)	Umidade média diária (%)	Precipitação média mensal (mm)	ET ₀ * média mensal (mm)
Jan.	31,3 ± 2,0	22,3 ± 1,6	15,8 ± 4,1	0,9 ± 0,5	83,1 ± 6	249,4 ± 108,6	88,0 ± 36,2
Fev.	31,1 ± 2,5	22,4 ± 1,6	15,9 ± 4,9	0,8 ± 0,4	83,8 ± 8	201,1 ± 110,3	74,6 ± 32,7
Mar.	31,5 ± 2,0	22,2 ± 0,8	16,3 ± 4,1	0,7 ± 0,3	85,8 ± 4	198,0 ± 128,3	89,9 ± 39,8
Abr.	31,9 ± 1,9	22,1 ± 0,9	16,3 ± 3,6	0,5 ± 0,3	85,3 ± 4	135,0 ± 111,2	82,7 ± 36,5
Mai	32,6 ± 2,0	20,6 ± 2,1	16,5 ± 3,1	0,6 ± 0,3	80,2 ± 4	30,3 ± 31,3	85,1 ± 37,7
Jun.	33,3 ± 1,8	18,9 ± 2,0	17,1 ± 2,5	0,7 ± 0,4	73,1 ± 6	4,8 ± 12,2	78,7 ± 36,8
Jul.	34,5 ± 1,7	17,3 ± 2,1	18,5 ± 1,9	0,9 ± 0,4	62,7 ± 7	8,0 ± 26,3	94,0 ± 45,5
Ago.	36,0 ± 2,0	18,4 ± 2,6	19,4 ± 3,1	0,9 ± 0,4	58,3 ± 9	7,9 ± 11,6	98,1 ± 48,0
Set.	36,1 ± 2,6	21,1 ± 1,7	19,1 ± 3,9	0,8 ± 0,4	65,5 ± 13	82,5 ± 73,9	106,7 ± 40,9
Out.	34,1 ± 2,7	22,2 ± 1,1	17,6 ± 4,2	0,9 ± 0,4	77,1 ± 8	150,3 ± 72,8	100,2 ± 36,6
Nov.	32,6 ± 2,4	22,4 ± 1,3	16,7 ± 4,5	0,8 ± 0,3	80,6 ± 8	197,3 ± 87,1	94,4 ± 27,9
Dez.	31,7 ± 2,4	22,6 ± 1,3	15,5 ± 4,7	0,8 ± 0,3	83,3 ± 7	271,0 ± 111,1	94,5 ± 42,2

* Calculado com base no modelo de Penman-Monteith.

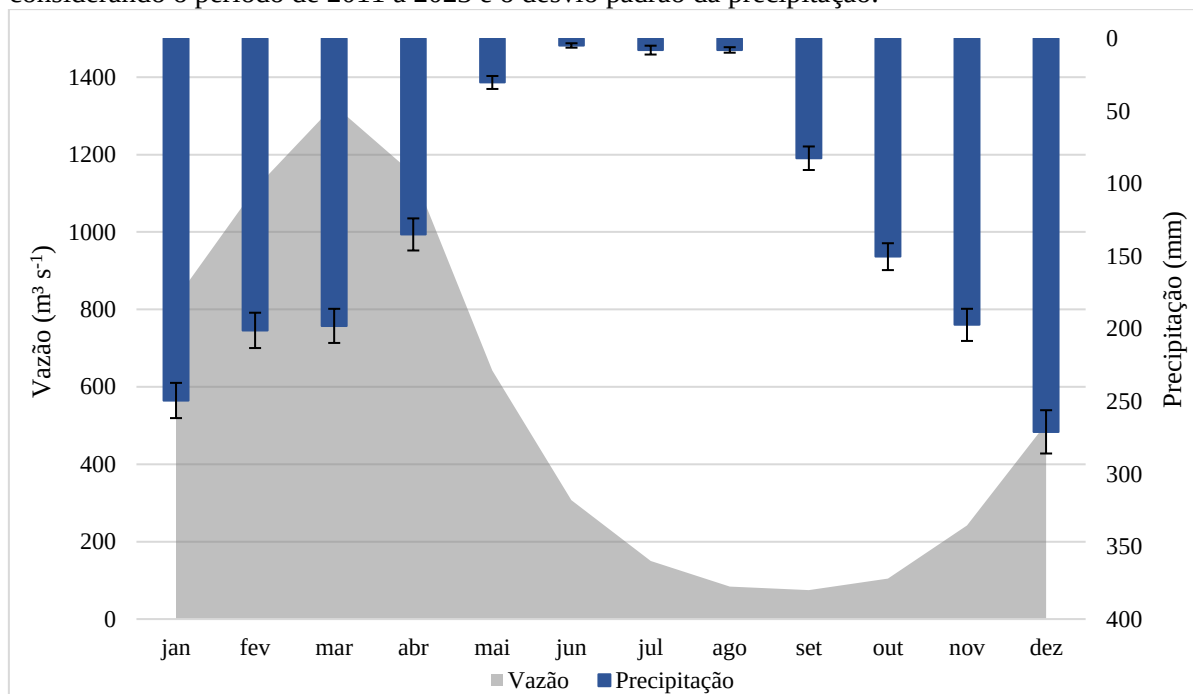
Assim como o clima, a vazão líquida da BH do rio Peixoto também é caracterizada por dois períodos distintos. O intervalo de maior vazão estende-se de dezembro a maio, com pico em março ($1.338,4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). Em contrapartida, o período de menor vazão ocorre entre junho e novembro, quando os volumes declinam significativamente até atingir o valor mínimo em setembro ($71,4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) (Figura 30).

Embora a vazão líquida siga a dinâmica estacional do clima, os momentos de máximos e mínimos hidrológicos não coincidem exatamente com os picos de precipitação (Figura 30). Apontando o

tempo de diferença entre as médias das máximas da precipitação em relação a vazão, apontando o atraso entre a entrada da chuva no sistema e o registro da vazão máxima no rio, decorrente de fatores como a infiltração da água no solo, a saturação dos aquíferos e a

resistência oferecida pela cobertura vegetal e pela declividade do terreno até que o excedente hídrico alcance o exutório.

Figura 30. Precipitação e vazão líquida média mensal da bacia hidrográfica do rio Peixoto de Azevedo, considerando o período de 2011 a 2023 e o desvio padrão da precipitação.



4.3.2. Evapotranspiração

Em função das condições climáticas, os maiores valores médios mensais de evapotranspiração de referência (ET_0) na bacia tendem a ocorrer no final da estação seca e no início da estação chuvosa, especialmente entre setembro e outubro (Figura 31 e Tabela 10). Nesse intervalo, a combinação de temperaturas elevadas, alta disponibilidade de radiação solar e o início das primeiras chuvas proporciona condições favoráveis ao aumento das taxas de evapotranspiração (Tabela 10).

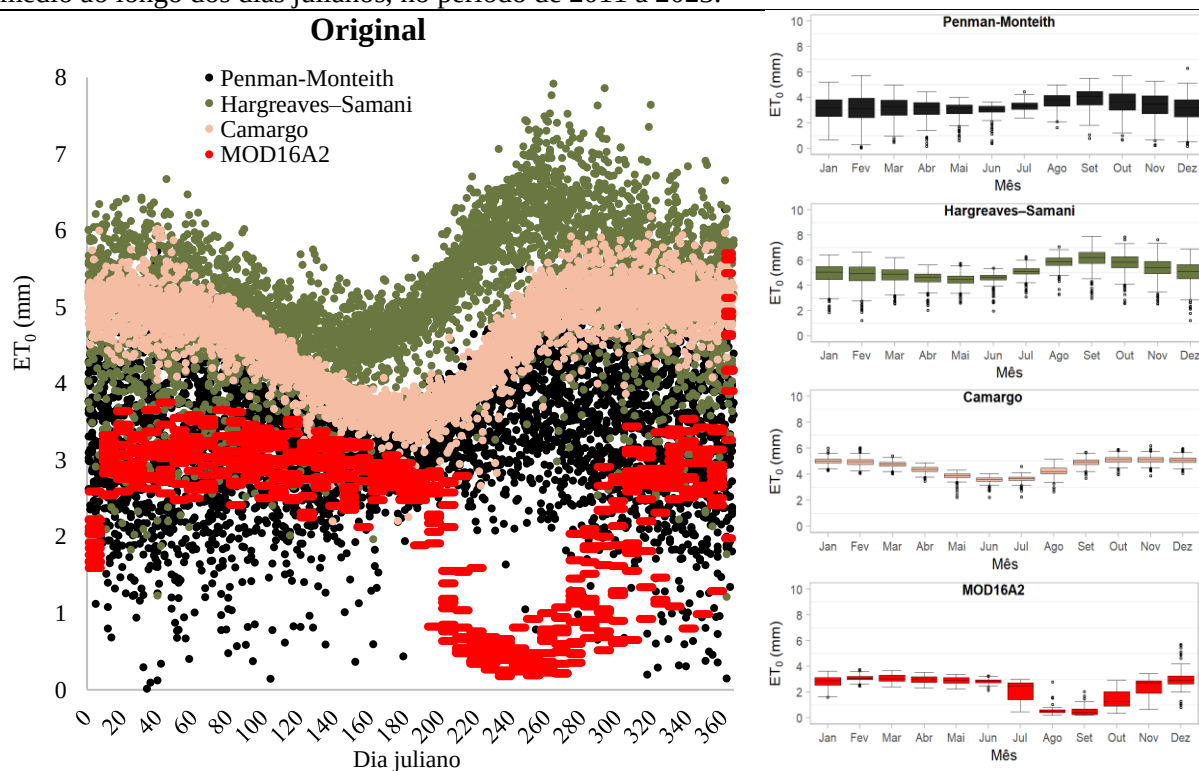
As séries temporais dos modelos também indicam que as estimativas de evapotranspiração acompanham a sazonalidade climática regional, com elevação a partir do final do período seco e máximas entre setembro e outubro. O modelo de Penman–Monteith (PM), que é o dado de referência, apresentou variações mais moderadas ao longo do ano, enquanto os modelos de Hargreaves–Samani (HS) e Camargo superestimaram sistematicamente a ET_0 em relação à PM, resultado mitigado na correção pelo viés (Figura 31).

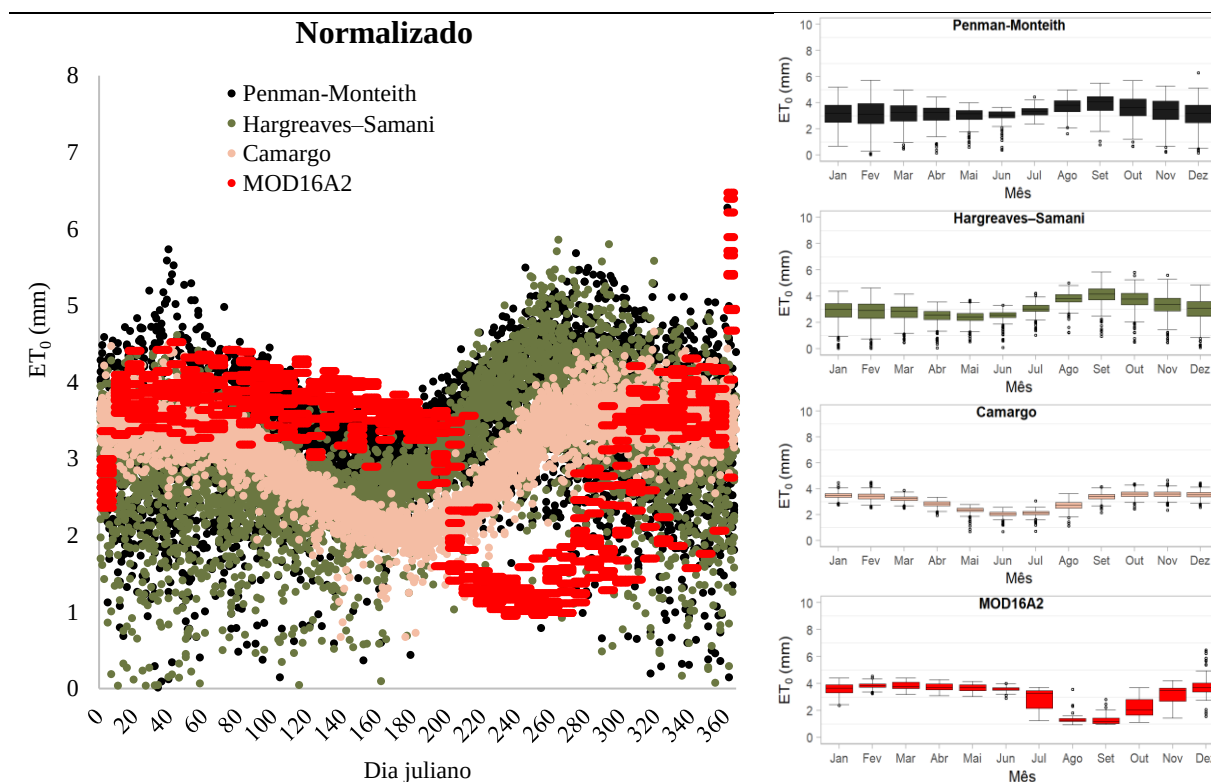
A análise da distribuição temporal evidenciou que os métodos de PM e HS apresentaram maior amplitude mensal da ET_0 , com redução dessa variabilidade nos meses mais secos (junho, julho e agosto). Em contraste, o modelo de Camargo apresentou menor amplitude dos valores

de ET_0 . Essas diferenças estão associadas ao grau de complexidade de cada modelo e ao conjunto de variáveis meteorológicas consideradas. O modelo de Camargo, por ser mais simples, baseia-se essencialmente na temperatura média do ar, enquanto o método de HS incorpora a amplitude térmica diária, a temperatura média e coeficientes de ajuste empíricos. O modelo de PM, por sua vez, é o mais completo, integrando variáveis de radiação solar, velocidade do vento, umidade relativa do ar e temperatura do ar, o que resulta em maior sensibilidade às variações atmosféricas (Figura 31).

O produto MOD16A2 apresentou comportamento divergente em relação às estimativas baseadas em dados meteorológicos de superfície. Enquanto os métodos de HS, PM e Camargo exibem tendência sazonal semelhante ao longo do ano, caracterizada pela redução da evapotranspiração no período seco e pelo aumento a partir de setembro, o MOD16A2 apresenta, no período de transição entre as estações seca e chuvosa, uma redução acentuada dos valores estimados. Esse comportamento resulta em subestimativa da evapotranspiração em comparação ao método de PM, especialmente nos meses de maior incremento da demanda evaporativa (Figura 31).

Figura 31. Distribuição da evapotranspiração de referência original e normalizada pelo erro absoluto médio ao longo dos dias julianos, no período de 2011 a 2023.





O desempenho estatístico dos modelos de estimativa da evapotranspiração de referência revelou variações em relação ao modelo de referência de PM. Considerando os dados originais, sem aplicação da correção, os modelos de HS e Camargo apresentaram tendência de superestimativa, evidenciada pelos valores positivos do MBE de 2,06 e 1,53 mm dia⁻¹, respectivamente, o que também se observa na distribuição dos dados na Figura 30. Hargreaves-Samani, além de apresentar o maior MBE, também registrou o maior RMSE de 2,12, indicando menor precisão geral entre os modelos testados (Figura 32).

Por outro lado, o MOD16A2 exibiu tendência oposta, indicando subestimativa e o menor MBE de -0,77 mm dia⁻¹; no entanto, quanto ao índice de concordância de Willmott, apresentou desempenho baixo, com valor de 0,17. Embora HS e Camargo tenham apresentado desempenhos inferiores ao MOD16A2 em MBE e RMSE, o índice de concordância de Willmott apresentou o melhor desempenho, com 0,44 em ambos os casos (Figura 32).

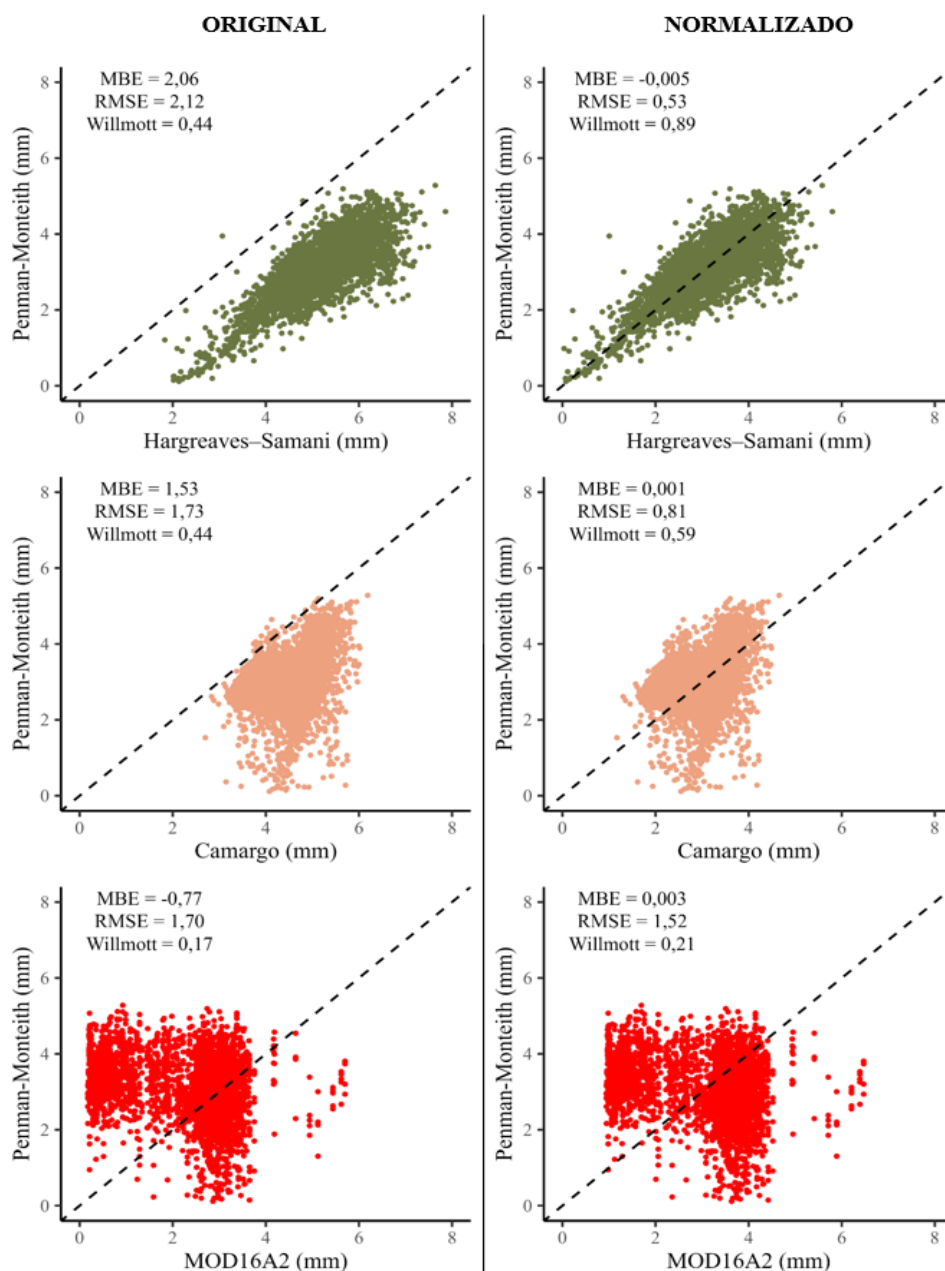
Após a remoção do desvio dos erros médios, observou-se melhora na performance de todos os métodos avaliados, com os valores de MBE aproximando-se de zero, indicando a eliminação quase total do viés sistemático, em relação ao dado observado. O método de HS destaca-se como o mais eficiente após o ajuste, apresentando RMSE de 0,53 mm dia⁻¹, e o maior índice de concordância de Willmott (0,89), alterando de um desempenho anteriormente insatisfatório para um ajuste considerado forte em relação ao método de PM. O método de Camargo também apresentou evolução, com MBE de 0,001 mm dia⁻¹ e índice de concordância

de Willmott de 0,59, embora ainda mantenha um RMSE superior ($0,81 \text{ mm dia}^{-1}$) ao de HS (Figura 32).

Apesar da correção do viés no produto MOD16A2 ($\text{MBE} = 0,003 \text{ mm dia}^{-1}$), ele continuou a apresentar menor precisão entre os modelos ($\text{RMSE} = 1,52 \text{ mm dia}^{-1}$) e um baixo índice de concordância de Willmott (0,21). Esses resultados sugerem que, embora a correção sistemática refine os dados, a variabilidade intrínseca das estimativas de sensoriamento remoto do MOD16A2 ainda apresenta baixa correlação com os dados da estação meteorológica A906, o que pode estar relacionado ao fato de os valores do MOD16A2 serem repetidos a cada 8 dias, devido à metodologia de disponibilização desses dados. Dessa forma, mesmo após a correção, não há variabilidade diária de ET_0 , como observado nos dados da estação meteorológica, o que se reflete em um índice de concordância de Willmott mais baixo (Figura 32).

Figura 32. Distribuição diária dos dados originais (à esquerda) e normalizados por Penman-Monteith (à direita) da evapotranspiração de referência, considerando o valor observado por Penman-Monteith e os

estimados por Hargreaves-Samani, Camargo e MOD16A2. Assim como seus respectivos desempenhos estatísticos.

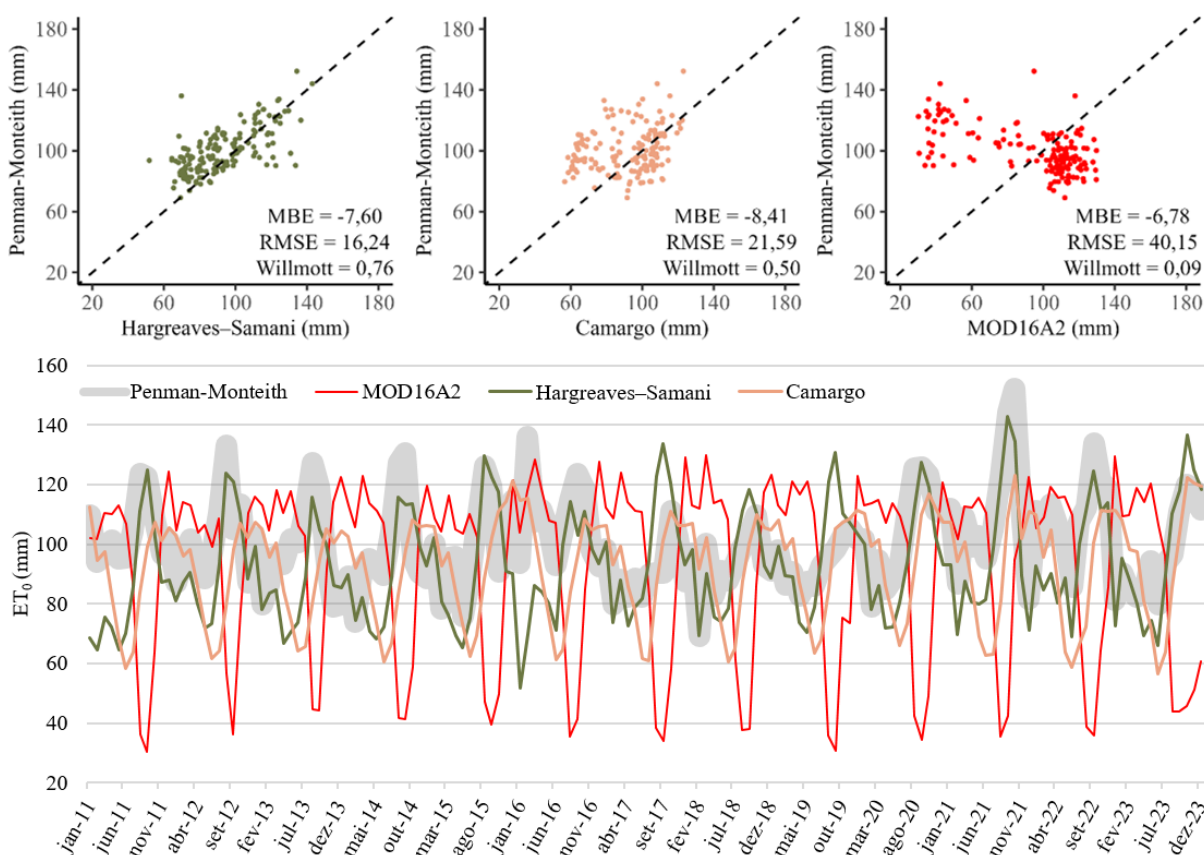


Ao longo de um período mensal, observou-se que todos os modelos avaliados subestimaram a ET_0 em relação ao método padrão de PM, como indicado pelos valores negativos do MBE. Entre os métodos analisados, o modelo de HS apresentou o melhor desempenho, com índice de concordância de Willmott igual a 0,76 e RMSE de 16,24 mm mês⁻¹, com MBE de -7,60 mm mês⁻¹. O modelo de Camargo obteve índice de concordância de Willmott de 0,50 e RMSE de 21,59 mm mês⁻¹, o que indica menor precisão na representação da variabilidade da evapotranspiração ao longo dos meses. O desempenho estatístico menos satisfatório foi observado para o produto MOD16A2, cujo índice de concordância de Willmott foi de 0,09, valor próximo de zero, indicando baixa capacidade do modelo de reproduzir os

dados observados na escala mensal. Além disso, o RMSE de $40,15 \text{ mm mês}^{-1}$, associado à elevada dispersão dos pontos em relação à linha de identidade (1:1), evidencia que as estimativas do produto MODIS não acompanham adequadamente a ET_0 observada pelo PM (Figura 33).

Para o modelo de HS, a média mensal estimada foi de $92,7 \pm 18,81 \text{ mm mês}^{-1}$, com coeficiente de variação de 20,29%, enquanto, na escala diária, a média foi de $3,05 \pm 0,85 \text{ mm dia}^{-1}$ (variação de 27,79%). Para o modelo de Camargo, a média mensal de $91,89 \pm 17,56 \text{ mm mês}^{-1}$ representou uma variação de 19,11%, valor muito próximo aos 19,64% registrados na escala diária ($3,06 \pm 0,6 \text{ mm dia}^{-1}$). E o produto MOD16A2 apresentou média mensal de $93,52 \pm 29,55 \text{ mm mês}^{-1}$ (variação de 31,6%), demonstrando uma redução em relação à escala diária, que registrou $3,06 \pm 1,07 \text{ mm dia}^{-1}$ (variação de 34,96%) (Figura 33).

Figura 33. Distribuição dos dados mensais da evapotranspiração de referência, considerando os valores observados pelo método de Penman-Monteith e os valores estimados pelos métodos de Hargreaves-Samani, Camargo e MOD16A2 (normalizados), bem como seus respectivos desempenhos estatísticos.



4.3.3. Simulação

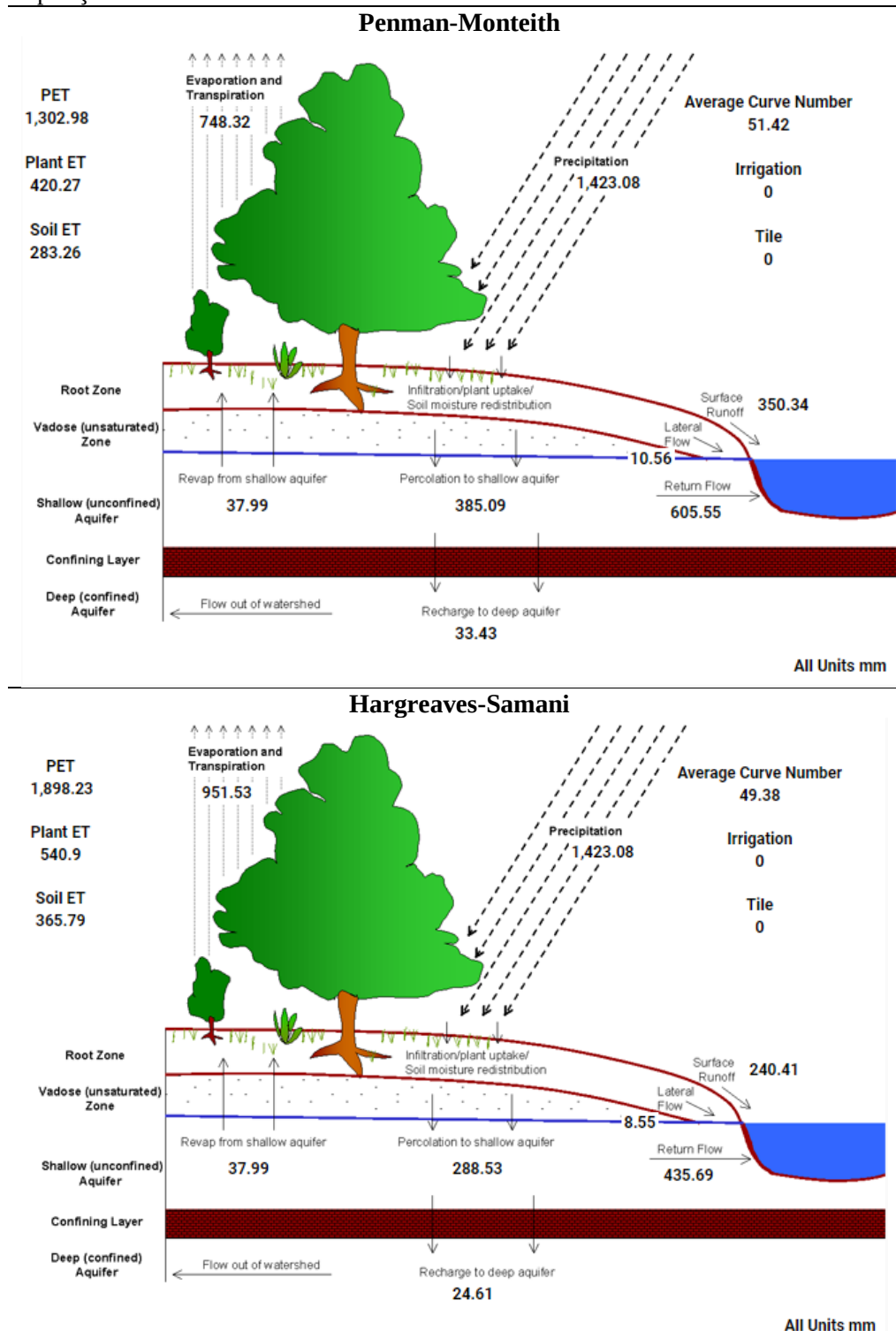
Com base nos dados inseridos no modelo SWAT, a bacia hidrográfica foi discretizada em 107 sub-bacias e 7.551 Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs). Do total da área modelada, 2.966,8 km² foram classificados como áreas de várzea, enquanto 16.485,5 km² correspondem a terras altas (áreas não sujeitas à inundação). Adicionalmente, foram identificados três reservatórios localizados na porção norte da bacia, totalizando uma área de 7,9 km². Essa configuração espacial estabelece a base física para a simulação dos processos hidrológicos.

Mantidas constantes todas as demais variáveis de entrada do modelo, incluindo os dados climáticos, a única alteração foi o método de estimativa da evapotranspiração de referência (ET₀), o que resultou em diferenças nos balanços hídricos simulados. A principal discrepância observada refere-se aos valores médios anuais de ET₀, em que o método de Hargreaves–Samani (HS) apresentou superestimativa de 595,25 mm anuais em relação ao método de Penman–Monteith (PM). Essa diferença, equivalente a aproximadamente 45%, se reflete nos demais componentes do balanço hídrico simulado (Figura 34).

Na modelagem SWAT, a evapotranspiração real (ET das plantas e do solo) é processada com base na demanda atmosférica (PET), mas limitada pela disponibilidade hídrica no perfil do solo. Considerando que o volume pluviométrico de 1.423,08 mm é o mesmo em ambos os cenários, a discrepância entre os métodos de estimativa torna-se um fator determinante no balanço final. Enquanto o cenário PM tem demanda mais moderada, o cenário de HS tem ET₀ tão elevada que converte uma fração maior da precipitação em vapor. O aumento na remoção de umidade pela atmosfera reduz a água armazenada no solo e resulta em menor disponibilidade hídrica para os processos de escoamento e infiltração, em comparação ao cenário PM. Essa dinâmica causa efeito nos demais componentes hidrológicos, uma vez que o aumento da fração de água destinada à evapotranspiração reduz os volumes de água do sistema (Figura 34).

No cenário HS, a rápida secagem do solo altera a umidade antecedente, parâmetro crítico para o método do Número da Curva (CN), tornando o solo mais receptivo à infiltração inicial devido ao maior déficit hídrico. O escoamento superficial (Surface Runoff) reduz-se de 350,34 mm para 240,41 mm em comparação ao cenário de PM. Paralelamente, a menor disponibilidade de água no perfil do solo limita a percolação para o aquífero raso, reduzindo-a de 385,09 mm para 288,53 mm, o que compromete o fluxo de retorno (Return Flow), que diminui de 605,55 mm para 435,69 mm. Esses resultados evidenciam que a superestimativa da ET₀ pelo método HS resulta em subestimativa sistemática da recarga subterrânea e da vazão da bacia hidrográfica (Figura 34).

Figura 34. Resumo dos resultados da simulação hidrológica da bacia hidrográfica do rio Peixoto de Azevedo, considerando os modelos de Penman-Monteith e de Hargreaves-Samani para a evapotranspiração de referência.



A avaliação do desempenho estatístico da ET_0 simulada pelo SWAT, tomando como referência a ET_0 calculada pelo método de PM a partir dos dados observados da estação meteorológica A906, evidenciou a superioridade do método de PM em relação ao método de HS normalizado. O cenário em que foi escolhido o método de PM apresentou baixo viés médio

(MBE = 0,29), reduzido erro quadrático médio (RMSE = 0,36) e elevado índice de concordância de Willmott ($d = 0,96$), indicando um excelente ajuste às observações. Em contraste, no cenário em que a escolha foi o modelo de HS, em comparação com o dado de HS corrigido, o modelo apresentou maior viés, maior magnitude de erro e menor índice de concordância, evidenciando superestimativa sistemática da ET_0 e menor aderência aos dados observados (Tabela 11).

Tabela 11. Desempenho estatístico da simulação da ET_0 na modelagem SWAT, considerando o dado observado e os valores calculados pelo modelo de Penman-Monteith com base nos dados da estação meteorológica A906.

Modelo	MBE	RMSE	Willmott
Penman-Monteith	0,29	0,36	0,96
Hargreaves-Samani – Normalizado*	2,13	2,17	0,48

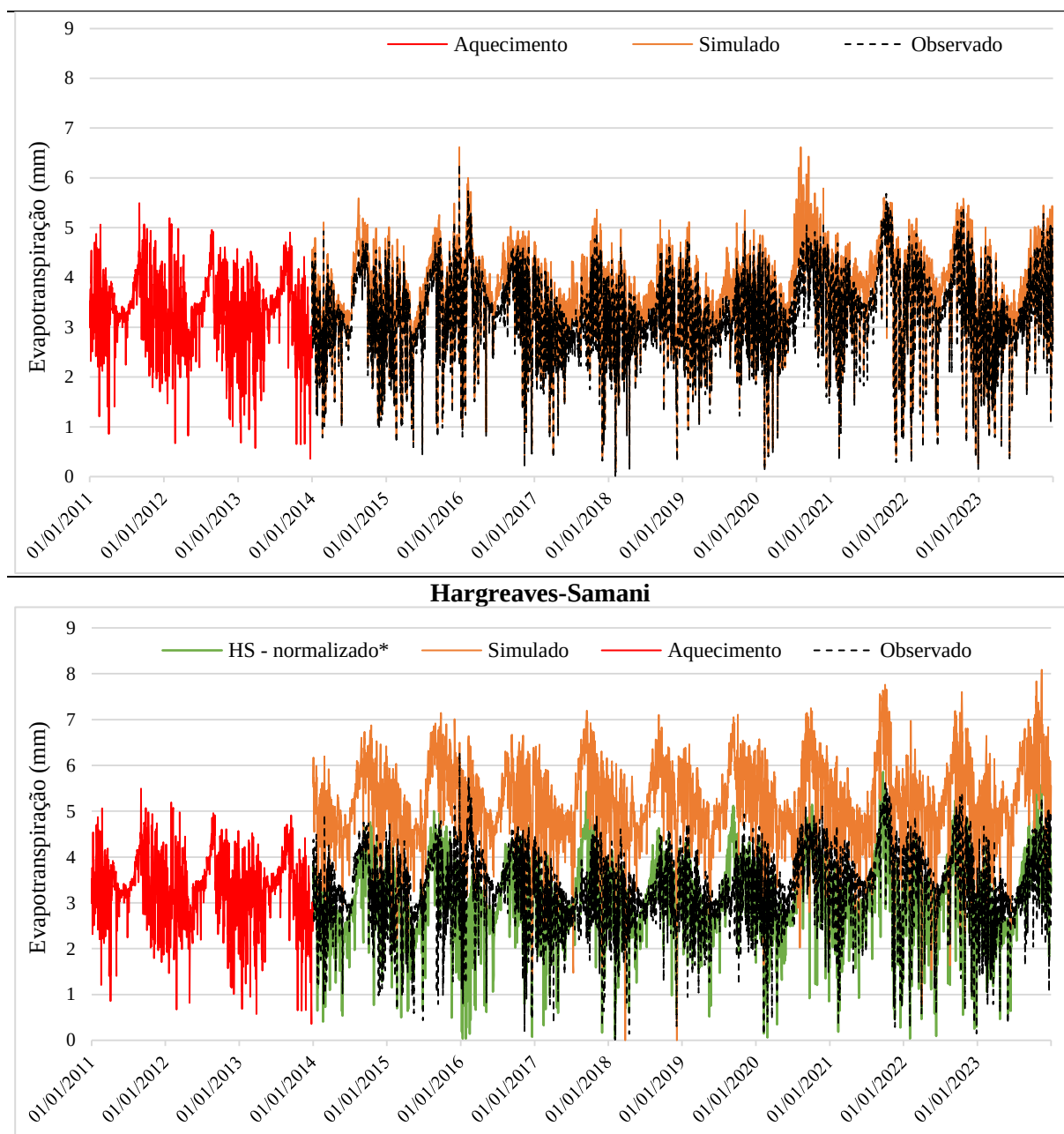
* ET_0 calculada com base no modelo de Hargreaves-Samani e normalizada pelos desvios da ET_0 do modelo de Penman-Monteith

O bom desempenho do método de PM também se evidencia na distribuição temporal apresentada na Figura 35, em contraste com o desempenho insatisfatório do método de HS. Embora a comparação estatística entre a ET_0 observada (calculada pelo método de PM com dados da estação meteorológica) e a ET_0 estimada pelo modelo de HS, após a correção, apresente resultados aceitáveis (Tabela 11), o desempenho do método de HS, quando aplicado no contexto da modelagem do SWAT, não atinge o mesmo nível de aderência (Figura 35).

Tanto os dados simulados quanto as estimativas obtidas pelo método de HS corrigido reproduzem a sazonalidade da evapotranspiração ao longo do ano; contudo, a análise da distribuição temporal evidencia claramente a superestimativa sistemática da ET_0 simulada pelo SWAT, com o modelo de HS, em relação aos valores observados (Figura 35).

Figura 35. Evapotranspiração diária (mm), de acordo com os valores observados (calculados com base nos dados da estação meteorológica A906 – pelo método de Penman-Monteith) e simulados pelo modelo SWAT, com os modelos de Penman-Monteith e Hargreaves-Samani.

Penman-Monteith



* ET_0 calculada com base no modelo de Hargreaves-Samani e normalizada pelos desvios da ET_0 estimada pelo modelo de Penman-Monteith.

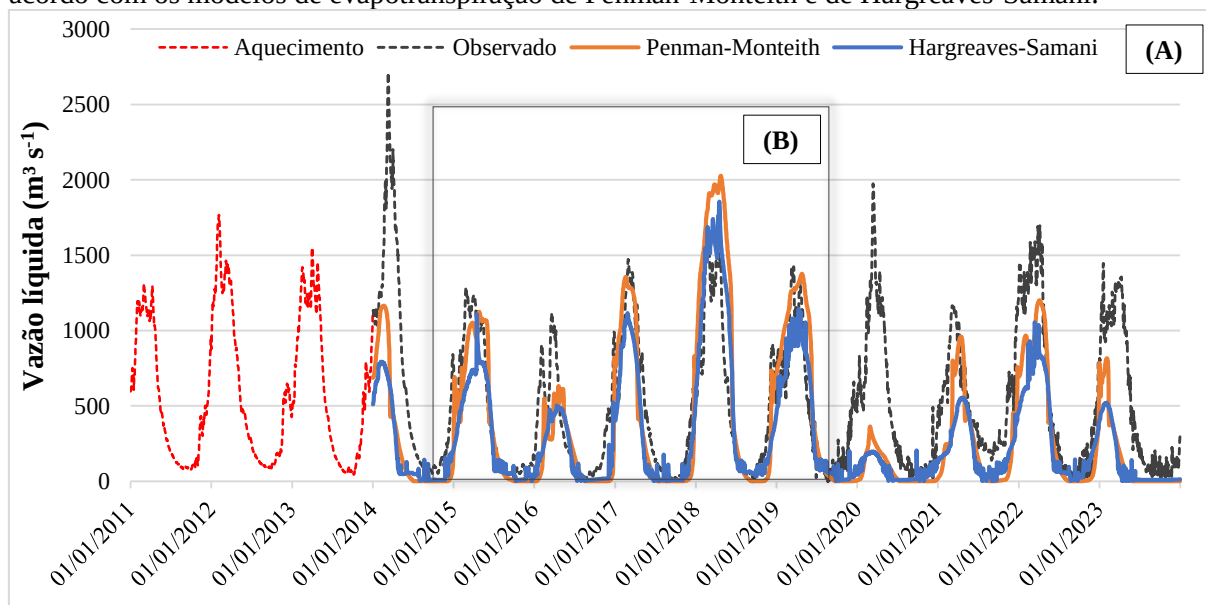
A comparação entre as vazões líquidas simuladas pelo modelo SWAT e os dados observados da estação fluviométrica indica que a escolha do método de estimativa da evapotranspiração influencia diretamente a acurácia da propagação das vazões. O cenário configurado com o método de PM apresentou melhor desempenho estatístico, com índice de concordância de Willmott de 0,82 e o menor erro quadrático médio ($RMSE = 410,76$). Em contraste, o cenário utilizando o método de HS apresentou desempenho ligeiramente inferior, com índice de Willmott de 0,77 e maior dispersão dos erros ($RMSE = 427,03$).

Ambos os cenários apresentaram valores negativos de MBE, indicando que o modelo SWAT tende a subestimar as vazões observadas na bacia. No entanto, essa subestimativa foi

mais acentuada no cenário de HS (MBE = -240,45) em comparação ao de PM (MBE = -175,94). Observa-se, ainda, que, nos períodos de vazões máximas, os valores observados superaram as estimativas de ambos os cenários simulados, exceto em 2018. Nestes eventos de pico, o cenário configurado com o modelo de PM apresentou vazões superiores às obtidas com o HS (Figura 36A).

Observa-se que, no período de 01 de janeiro de 2015 a 31 de dezembro de 2019, há uma melhora na concordância entre os valores observados e estimados, comprovada pelo desempenho estatístico. O método de PM apresentou redução substancial do viés, com MBE de $-13,19 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. O método de HS, ainda que tenha reduzido consideravelmente o viés, manteve uma subestimativa mais pronunciada, com MBE de $-102,21 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Quanto ao RMSE, o cenário PM apresentou erro residual ligeiramente superior, de $303,72 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, em comparação com $250,87 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ de HS. Mas ambos os métodos obtiveram coeficientes de concordância de Willmott superiores a 0,91, o que atesta a elevada capacidade de representação do modelo no referido recorte temporal. A convergência entre os valores observados e simulados neste período sugere maior estabilidade da resposta hidrológica da bacia frente às variáveis de entrada do modelo (Figura 36B).

Figura 36. Vazão observada com base nas estações fluviométricas e na metodologia descrita acima, no período de aquecimento de 2011 a 2013. E vazões estimadas pela simulação do modelo SWAT, de acordo com os modelos de evapotranspiração de Penman-Monteith e de Hargreaves-Samani.



4.3.4. Análise de sensibilidade e calibração

A simulação da ET_0 com o modelo de Hargreaves-Samani apresentou grande disparidade entre o valor da vazão líquida simulada pelo modelo SWAT e a observada na Bacia

do rio Peixoto de Azevedo, dessa forma, optou-se por não realizar a análise de sensibilidade e a calibração, visto que são processos onerosos.

Considerando os resultados da análise de sensibilidade aos parâmetros, para a calibração foram selecionados apenas os parâmetros que apresentaram sensibilidade superior a 0,001. Desta forma, sete parâmetros foram utilizados na calibração (Tabela 12).

De acordo com os resultados da análise de sensibilidade, a condutividade hidráulica efetiva no canal (CHK.rte) é o parâmetro de maior sensibilidade (0,943), indicando que pequenas variações em seu valor impactam a vazão líquida. Esse resultado evidencia a forte dependência do modelo em relação aos processos hidráulicos de propagação do fluxo no canal principal (Tabela 12).

Em um segundo nível de influência, porém com valores significativamente menores, estão os parâmetros PERCO.hru (coeficiente de percolação), com sensibilidade de 0,011, e PETCO.hru (fator de compensação da evapotranspiração potencial pelas plantas) e FLO_MIN.aqu (vazão mínima do aquífero raso necessária para a liberação de água ao curso d'água), ambos com sensibilidade de 0,008. Esses resultados indicam que os processos de percolação da água no solo, a evapotranspiração da vegetação e a contribuição do aquífero raso para o escoamento influenciam moderadamente o comportamento da vazão líquida (Tabela 12).

Os parâmetros REVAP_CO.aqu (0,005), relacionado à transferência de água do aquífero raso para a zona radicular, ESCO.hru (0,003), associado à evaporação do solo, e CN2.hru (0,002), referente ao escoamento superficial direto baseado no uso do solo e na umidade, apresentam baixa sensibilidade. Esses parâmetros influenciam os processos de armazenamento e a disponibilidade de água no solo, mas têm menor impacto na vazão líquida (Tabela 12).

E os parâmetros CANMX.hru e EPCO.hru apresentaram sensibilidade muito baixa (0,001), enquanto OVN.hru, SURLAG.bsn, LATQ_CO.hru, K.sol e REVAP_MIN.aqu apresentaram valores nulos de sensibilidade, indicando influência praticamente inexistente no contexto da simulação realizada. E o parâmetro ALPHA.aqu apresentou sensibilidade negativa (-0,018), sugerindo relação inversa com a variável analisada (Tabela 12).

Tabela 12. Sensibilidade dos parâmetros avaliados na análise de sensibilidade

Parâmetro	Descrição	Limites		Sensibilidade
		Mín	Máx.	
CHK.rte	Condutividade hidráulica efetiva no canal (mm hr^{-1})	1,0	150	0,943*
PERCO.hru	Coeficiente de percolação (adimensional)	0	2,0	0,011*
PETCO.hru	Fator de compensação da evapotranspiração potencial das plantas (%).	0,7	1,2	0,008*
FLO_MIN.aqu	Vazão mínima que o aquífero precisa ter para liberar água para o curso d'água (m)	-25	50	0,008*

REVAP_CO.aqu	Controle da transferência de água do aquífero raso para a zona de raízes (adimensional).	0	0,2	0,005*
ESCO.hru	Fator de compensação da evaporação do solo (adimensional).	0,01	0,9	0,003*
CN2.hru	Curva Número inicial para a condição de umidade AMC II (adimensional)	-25	25	0,002*
CANMX.hru	Interceptação máxima de água pelo dossel vegetal (mm)	0	10	0,001
EPCO.hru	Fator de compensação de absorção pelas plantas (adimensional)	0,01	1,0	0,001
OVN.hru	Coefficiente de Manning para fluxo terrestre (adimensional).	-20	20	0,000
SURLAG.bsn	Coefficiente de atraso do escoamento superficial (dias)	-15	15	0,000
LATQ_CO.hru	Fator de defasagem do fluxo lateral	0	1	0,000
K.sol	Condutividade hidráulica do solo saturado (mm h^{-1})	-10	10	0,000
REVAP_MIN.aqu	Limiar de profundidade da água no aquífero raso para que ocorra percolação para o aquífero profundo (mm)	0	10	0,000
ALPHA.aqu	Fator de recessão do fluxo de base (dias^{-1})	0,01	0,9	-0,018

A avaliação do desempenho da calibração dos modelos, por meio do coeficiente KGE, indicou que a adição da evapotranspiração pelo método de Penman-Monteith aumentou a eficiência do modelo para 0,803, superando a calibração univariada baseada apenas na vazão ($\text{KGE} = 0,691$). Contudo, para o método de Camargo ($\text{KGE} = 0,424$), o desempenho multivariado foi inferior ao univariado, assim como o desempenho obtido com o produto MOD16A2 ($\text{KGE} = 0,027$), que foi inferior ao de todas as demais propostas de calibração (Tabela 13).

Avaliando os valores calibrados para cada cenário de calibração, observa-se variação nos parâmetros associados, principalmente nos processos de geração de escoamento e de evapotranspiração e na interação entre o solo e o aquífero. Contudo, os parâmetros CHK.rte e REVAP_CO.aqu mantiveram-se constantes em todas as estratégias de calibração, o que sugere que respondem a condicionantes estruturais da bacia hidrográfica que transcendem a variabilidade dos métodos de ET_0 (Tabela 13).

Os demais parâmetros apresentam variações nos valores devido à demanda evaporativa dos métodos de ET_0 . O parâmetro CN2.hru, relacionado ao potencial de geração de escoamento superficial, apresentou variações significativas entre os métodos. Na calibração univariada, o valor foi de -20,743, enquanto, na calibração multivariada, os valores variaram entre -3,641 (Penman–Monteith) e -18,565 (Camargo), evidenciando ajustes no balanço entre infiltração e escoamento superficial decorrentes da inclusão da evapotranspiração no processo de calibração. O valor apresentado pela calibração univariada é uma forma de compensar picos de cheia; esse comportamento indica que, ao representar de forma mais realista as perdas de água para a

atmosfera (PM), o modelo reduz a necessidade de ajustes no escoamento superficial para fechar o balanço hídrico (Tabela 13).

Os parâmetros PERCO.hru e ESCO.hru, relacionados aos processos de percolação e evaporação do solo no SWAT, apresentaram comportamentos distintos entre os métodos de calibração. Enquanto o PERCO.hru manteve valores semelhantes entre os cenários (0,948–0,959), indicando relativa estabilidade do processo de percolação, o ESCO.hru apresentou variação mais expressiva, atingindo 0,229 na calibração multivariada com ET_0 de PM e permanecendo próximo de 0,010 nos demais métodos. Esse aumento sugere que, ao considerar uma demanda atmosférica mais realista, o modelo passa a mobilizar água de camadas mais profundas do solo para atender à evaporação, processo que tende a ser subestimado quando a calibração se baseia apenas na vazão (Tabela 13).

Sobre o parâmetro PETCO.hru, o valor de 1,027 associado ao produto MOD16A2 indica a tentativa do processo de calibração de compensar os baixos valores de ET_0 presentes nos dados de sensoriamento remoto, especialmente nos períodos com altos valores de PM, que é a referência (Figura 33), aumentando o consumo hídrico vegetal para manter coerência com a vazão observada (Tabela 13).

O parâmetro FLO_MIN.aqu, relacionado ao fluxo mínimo do aquífero para contribuição ao curso d'água, apresentou diferenças relevantes entre os métodos; a divergência observada no parâmetro FLO_MIN.aqu entre os métodos de ET_0 pode ser explicada pela subestimativa do método de Camargo, especialmente durante o período de estiagem (Figura 33). Ao fornecer valores de demanda atmosférica inferiores aos obtidos pelo método de PM, o modelo de Camargo induz um superávit hídrico artificial no solo. Para compensar o excesso e manter a acurácia da vazão simulada, o processo de calibração reduziu o limiar de ativação do aquífero (FLO_MIN.aqu) para 12,187 mm. Essa compensação matemática mascara a realidade física da bacia, o que justifica o menor desempenho estatístico deste método ($KGE = 0,424$) em comparação à calibração multivariada com PM ($KGE = 0,803$) (Tabela 13).

Considerando o valor limite de 50,000 tanto para a calibração univariada quanto para o produto MOD16A2, para o parâmetro FLO_MIN.aqu. Esse comportamento aponta para o possível efeito de borda na otimização, em que a instabilidade e os ruídos inerentes ao sensor remoto (evidenciados pelo baixo KGE de 0,027) levaram o algoritmo a priorizar a manutenção da vazão de base em detrimento da precisão da evapotranspiração. Ao atingir o limite superior do parâmetro, o SWAT buscou maximizar a retenção de água no aquífero raso para compensar as inconsistências no balanço hídrico decorrentes de valores de ET_0 desconexos no MOD16A2, resultando em uma estrutura de parâmetros idêntica à da calibração univariada (Tabela 13).

Tabela 13. Valores calibrados para os diferentes métodos de calibração.

Parâmetro	Calibração univariada	Calibração multivariada (vazão + evapotranspiração)		
	Vazão	Penman-Monteith	Camargo ¹	MOD16A2 ¹
CHK.rte	1,000	1,000	1,000	1,000
PETCO.hru	0,977	0,873	0,923	1,027
CN2.hru	-20,743	-3,641	-18,565	-17,844
PERCO.hru	0,959	0,948	0,953	0,959
ESCO.hru	0,010	0,229	0,010	0,010
REVAP_CO.aqu	0,000	0,000	0,000	0,000
FLO_MIN.aqu	50,000	34,263	12,187	50,000

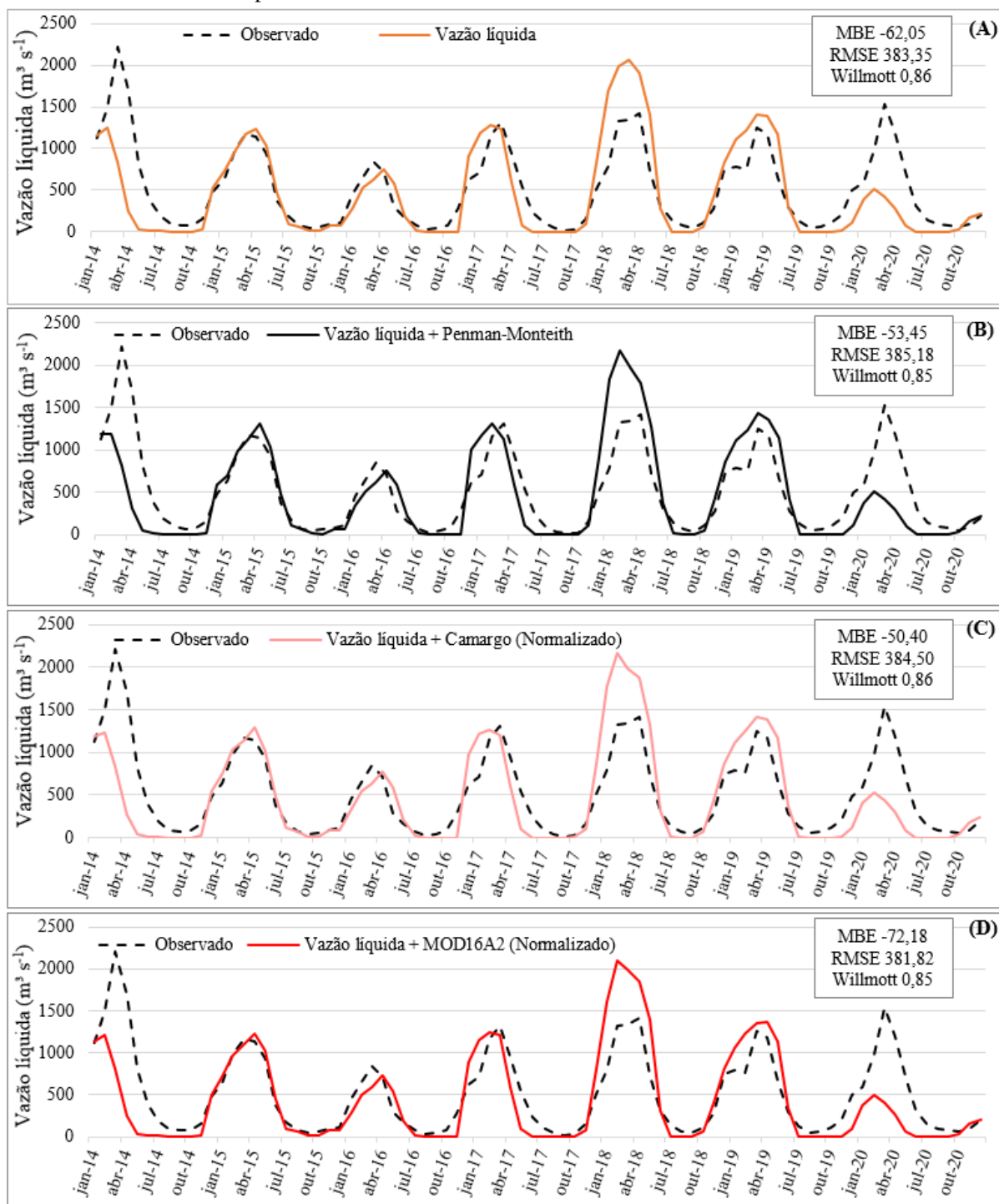
¹ ET₀ normalizado pelo ET₀ do método de Penman-Monteith.

Os resultados apresentados nos hidrogramas indicam que todas as calibrações apresentam boa aderência à sazonalidade da bacia, mantendo o índice de concordância de Willmott em um patamar satisfatório, entre 0,85 e 0,86. Contudo, a análise do erro de viés médio (MBE) indica que todas as simulações tendem a subestimar a vazão líquida total, com valores negativos que variam de -50,40 (método de Camargo) a -72,18 (MOD16A2). Essa subestimativa é evidente principalmente nos picos de 2014 e 2020, em que a vazão observada foi significativamente superior à simulada. Por outro lado, em 2018, observa-se um comportamento inverso, com superestimativa acentuada dos picos em todos os cenários (Figura 37).

Além da discrepância nos valores máximos, observa-se que as vazões líquidas mínimas simuladas pelas calibrações são inferiores às observadas (Figura 37). Enquanto a média das vazões líquidas mínimas observadas (entre agosto e outubro) é de 64,9 m³ s⁻¹, os modelos calibrados apresentaram médias significativamente menores: 9,9 m³ s⁻¹ na calibração univariada; 10,6 m³ s⁻¹ na multivariada com o método de Camargo; 9,1 m³ s⁻¹ com o MOD16A2; e 9,6 m³ s⁻¹ na calibração multivariada via Penman-Monteith (PM).

Figura 37. Vazão líquida observada e cenários de vazão líquida calibrada: (A) apenas a vazão líquida; (B) vazão líquida e ET₀ pelo método de Penman-Monteith; (C) vazão líquida e ET₀ pelo método de

Camargo, normalizado pelo método de Penman-Monteith; e (D) vazão líquida e ET_0 do produto MOD16A2, normalizado pelo método de Penman-Monteith.



4.4. Discussão

Os resultados dos dados climáticos encontrados apresentam tendências sazonais nos elementos climáticos, assim como as observadas por Souza et al. (2013) em estações

meteorológicas localizadas na região norte e no centro-norte do estado de Mato Grosso. No entanto, os valores não são os mesmos, apresentando diferença de aproximadamente 279,26 mm de precipitação em relação à estação mais próxima, a de Matupá. As diferenças mensais na temperatura do ar variaram entre 1,0 e 3,0 °C, com uma diferença média anual de 3,0 °C, conforme relatado por Souza et al. (2013). Contudo, isso pode estar associado ao fato de não se tratar da mesma estação meteorológica e de haver um período de análise diferente.

Avaliando o desempenho estatístico da ET_0 , tendo como dado observado o Penman-Monteith (PM), que apontou Camargo como o melhor desempenho, quando comparado ao Hargreaves-Samani (HS), também foi verificado por Tanaka et al. (2016) que ambos os modelos superestimaram a ET_0 . Mas os desempenhos estatísticos obtidos nesse trabalho para a ET são inferiores aos de Tanaka et al. (2016).

Considerando o desempenho da simulação da vazão líquida, o cenário em que foi utilizado o método de ET_0 por Penman-Monteith apresentou melhores estatísticas aos comparar a vazão líquida simulada com a vazão líquida observada, em detrimento ao cenário em que foi usado o método de Hargreaves-Samani, isso reforça que apesar da vantagem operacional de HS a amplitude térmica isolada, utilizada pelo método, não é o suficiente para representar a complexidade do processo evaporativo da bacia do rio Peixoto de Azevedo. A superioridade do método de PM frente ao de HS pode ser verificada na grande quantidade de trabalhos científicos que o usam (Da Silva et al., 2018; Amorim et al., 2020; Junqueira et al., 2022; Cecconello et al., 2025), mas também foi identificado com o melhor desempenho na simulação da vazão, por Ferreira et al. (2021a), em uma bacia com comportamento climático tropical (verão chuvoso e inverno seco). A superioridade do método de PM também é verificada no desempenho da calibração multivariada em que o método é utilizado ($KGE = 0,803$).

Os resultados evidenciam a necessidade de uma avaliação integrada à modelagem hidrológica, além de análises isoladas de métricas estatísticas. Sob a ótica estritamente pautada no desempenho univariado da vazão líquida ($KGE = 0,691$), esta estratégia seria priorizada em detrimento da calibração multivariada, devido à menor complexidade computacional e de aquisição de dados em comparação ao método de Penman-Monteith (PM). Contudo, a análise da parametrização resultante demonstra que a inserção da ET_0 atua como um restritor físico no algoritmo de calibração, induzindo o modelo a uma representação mais precisa das partições do balanço hídrico.

A fragilidade de otimizações baseadas em dados de entrada é evidenciada ao analisar a calibração multivariada do método ET_0 de Camargo. Embora o ajuste do hidrograma simulado tenha se mostrado estatisticamente aceitável para a vazão, o desempenho global do modelo não

foi tão interessante ($KGE = 0,424$), inferior tanto à abordagem univariada quanto à multivariada pelo método de ET_0 por PM. Esta divergência é atribuída à limitação intrínseca do método de Camargo na representação da dinâmica evaporativa local: a despeito de apresentar um erro médio de viés diário quase nulo ($MBE = 0,001$), a formulação falhou em capturar a variabilidade temporal da ET_0 . Traduzindo esse déficit em baixos índices de concordância de Willmott na escala diária ($d = 0,59$) e mensal ($d = 0,50$), com subestimativas no tempo mensal ($MBE = -8,41$ mm).

Na calibração multivariada, utilizando a vazão líquida observada e a ET_0 de Camargo, que apresenta menor demanda evaporativa, o algoritmo de calibração forçou a compensação de parâmetros hidrológicos para acomodar um dado de entrada (ET_0) de menor qualidade, gerando a 'resposta certa pelos motivos errados', indicando que o modelo estaria transferindo ou retirando água das partições do balanço hídrico para melhorar o ajuste da vazão.

A necessidade de avaliar todos os aspectos da modelagem hidrológica também pode ser verificada ao se considerar o dado MOD16A2 utilizado na calibração. Seus resultados foram ruins em todos os momentos da modelagem; contudo, assim como na calibração de Camargo, o desempenho estatístico entre a vazão líquida observada e a calibrada mostrou-se relativamente próximo ao das demais calibrações. Apesar de ser o produto de evapotranspiração mais utilizado em estudos amazônicos (Dangol et al., 2023; Castagna et al., 2024), o MOD16A2 não apresentou desempenho satisfatório.

Dessa forma, verifica-se que a calibração multivariada pode melhorar a modelagem da bacia, como apontado por Franco, Oliveira e Bonumá (2020); contudo, a variável adicionada à calibração, juntamente com a vazão líquida, precisa apresentar boa representatividade em relação aos dados reais da bacia hidrográfica.

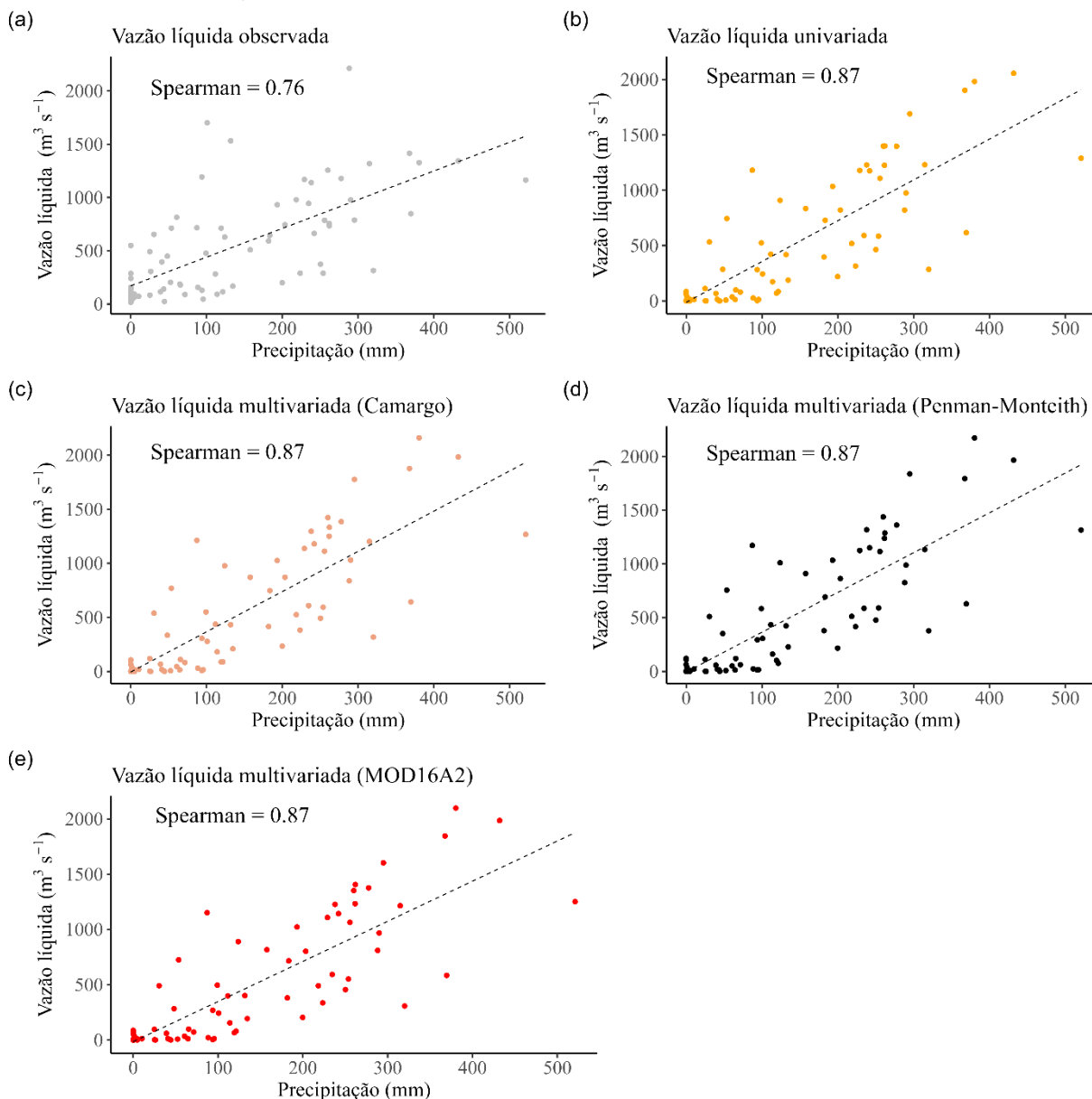
Por fim, cabe ressaltar uma observação: a ausência de ajuste estatístico perfeito entre as vazões observadas e as calibradas pelo modelo SWAT, tanto na calibração univariada quanto na multivariada, suscita questionamentos metodológicos relevantes. Tais discrepâncias podem decorrer de incertezas nos dados de entrada (como a precipitação), de imprecisões nos registros hidrométricos ou de limitações inerentes aos processos de modelagem e de calibração. Alternativamente, essa divergência pode refletir apenas a diferença entre a natureza matemática de um modelo e a complexidade caótica da natureza.

Essa última hipótese pode ser corroborada pela análise do coeficiente de correlação de Spearman (Figura 38). Ao se comparar a relação precipitação versus vazão líquida (ambas observadas) com a relação precipitação observada versus vazão líquida calibrada pelas diferentes abordagens, constata-se que a primeira apresenta correlação inferior à da segunda.

Considerando que a vazão natural é uma resposta à precipitação mediada por múltiplos fatores ambientais, a correlação entre os dados estritamente observados reflete o ruído e a complexidade do sistema real. O fato de a vazão calibrada apresentar uma correlação mais forte com a precipitação evidencia que a modelagem, por ser uma tentativa matemática de replicar a natureza, tende a simplificar e superestimar a dependência direta entre essas variáveis, atenuando as respostas caóticas naturais.

Figura 38. Correlação de Sperman¹, entre a (a) precipitação e a vazão líquida observada na bacia hidrográfica do rio Peixoto de Azevedo; (b) precipitação e vazão líquida resultado da calibração univariada; (c) precipitação e vazão líquida resultado da calibração multivariada (vazão líquida + ET_0 pelo método de Camargo); (d) precipitação e vazão líquida multivariada (vazão líquida + ET_0 pelo

método de Penman-Monteith) e (e) precipitação e vazão líquida multivariada (vazão líquida + ET_0 pelo método de MOD16A2).



¹ A correlação de Spearman foi calculada ao longo do tempo mensal e considerou-se o período de defasagem de 3 meses, com base no máximo de precipitação e no máximo de vazão líquida, conforme observado na Figura 30.

A partir dessa última concepção e observação, além de confirmar que os objetivos centrais deste artigo foram atingidos, torna-se oportuno trazer à luz a reflexão sobre a complexidade da modelagem ambiental. O SWAT destaca-se por ser um modelo robusto e sofisticado, que integra múltiplos processos hidrológicos em uma arquitetura computacional. Entender suas limitações diante do caos natural não diminui sua aplicabilidade, mas baliza o rigor metodológico necessário à interpretação de seus dados. Contudo, aceitar que o modelo não reproduz a natureza em sua totalidade não invalida seus resultados, pelo contrário, reforça a maturidade científica de reconhecê-lo como uma abstração útil. Suas saídas fornecem

direcionamentos para a tomada de decisão, o planejamento ambiental e a gestão de recursos hídricos.

4.5. Conclusão

Conforme os resultados, na bacia hidrográfica do rio Peixoto de Azevedo, a adição da ET_0 obtida por sensoriamento remoto, com base no MOD16A2, não promoveu melhorias na calibração da vazão líquida. Pelo contrário, a vazão líquida resultante da calibração multivariada com o MOD16A2 e a vazão líquida observada apresentaram pior desempenho estatístico quando comparadas à calibração univariada, pautada exclusivamente na vazão observada.

A calibração multivariada apresentou resultados superiores aos da calibração univariada quando a ET_0 foi calculada pelos métodos de Camargo e de Penman-Monteith. Contudo, considerando aspectos além do desempenho estatístico final (comparação entre a vazão líquida calibrada e a vazão líquida observada), a calibração multivariada com a vazão observada e o ET_0 pelo método de Penman-Monteith apresentou melhor desempenho.

A calibração multivariada com a vazão observada e o ET_0 pelo método de Penman-Monteith não apenas otimizou a simulação da vazão, mas também assegurou uma representação fisicamente coerente do balanço hídrico, mitigando o risco de compensações matemáticas irreais na estrutura de armazenamento da bacia.

O modelo SWAT demonstrou ser uma ferramenta robusta e altamente capaz de simular a dinâmica hidrológica da bacia do rio Peixoto de Azevedo, mesmo diante da escassez de dados locais de monitoramento e da expressiva complexidade fisiográfica inerente à vasta escala territorial. Contudo, os resultados reiteram a premissa fundamental da modelagem: a acurácia das simulações depende intrinsecamente da confiabilidade e da resolução dos dados de entrada.

Para o avanço das pesquisas na região Sul da Amazônia, recomenda-se a avaliação de novos produtos de sensoriamento remoto, a incorporação de levantamentos pedológicos in situ e a integração de dados hidrogeológicos detalhados. Essa necessidade de aprofundamento justifica-se pelos resultados desta primeira aproximação, que evidenciaram o papel estrutural e a forte influência da dinâmica subterrânea (lençol freático) na regulação do balanço hídrico da bacia.

4.6. Referências bibliográficas

ABBASPOUR, Karim C.; VAGHEFI, Saeid Ashraf; SRINIVASAN, Raghvan. A Guideline for Successful Calibration and Uncertainty Analysis for Soil and Water Assessment: A Review of Papers from the 2016 International SWAT Conference. **Water**, v. 10, n. 1, p. 6, jan. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w10010006>. Acesso em: 02 out. 2025.

ABE, Camila Andrade *et al.* Modelling the effects of historical and future land cover changes on the hydrology of an Amazonian basin. **Water**, v. 10, n. 7, p. 932, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w10070932>. Acesso em: 15 set. 2025.

ABOU RAFEE, Sameh A. *et al.* Land Use and Cover Changes versus climate shift: Who is the main player in river discharge? A case study in the Upper Paraná River Basin. **Journal of Environmental Management**, v. 309, p. 114651, maio 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114651>. Acesso em: 30 ago. 2025.

ALMEIDA, Rafael A.; PEREIRA, Silvio B.; PINTO, Daniel B. F. Calibration and validation of the SWAT hydrological model for the Mucuri river basin. **Engenharia Agrícola**, v. 38, n. 1, p. 55–63, jan. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v38n1p55-63/2018>. Acesso em: 02 out. 2025.

AMORIM, Jhones da S. *et al.* Evaluation of satellite precipitation products for hydrological modeling in the Brazilian cerrado biome. **Water**, v. 12, n. 9, p. 2571, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w12092571>. Acesso em: 30 jul. 2025.

AMORIM, Jhones da Silva *et al.* Quantifying the climate change-driven impacts on the hydrology of a data-scarce watershed located in the Brazilian Tropical Savanna. **Hydrological Processes**, v. 36, n. 7, jul. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/hyp.14638>. Acesso em: 13 set. 2025.

ANADEM. **Modelo Digital de Terreno para a América do Sul**, 2018. <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/93664c15-1ff8-4e87-bbed-2bb69d321309>. Acesso em: 15 jul. 2025.

ANDRADE, Carolyn W. L. de *et al.* Soil moisture and discharge modeling in a representative watershed in northeastern Brazil using SWAT. **Ecohydrology & Hydrobiology**, v. 19, n. 2, p. 238–251, 1 abr. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1642359318300624>. Acesso em: 28 nov. 2025.

ARNOLD, J. G. *et al.* SWAT: Model Use, Calibration, and Validation. **Transactions of the ASABE**, v. 55, n. 4, p. 1491–1508, 2012a. Disponível em: <https://swat.tamu.edu/media/99051/azdezasp.pdf>. Acesso em: 10 maio 2025.

ARNOLD, Jeffrey G. *et al.* Soil and Water Assessment Toll: Input/Output Documentation, version 2012. **Texas Water Resources Institute**, v. 7, 2012b. Disponível em: <https://swat.tamu.edu/media/69296/swat-io-documentation-2012.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2025.

BENITES, Vinícius M. *et al.* Pedotransfer functions for estimating soil bulk density from existing soil survey reports in Brazil. **Geoderma**, v. 139, n. 1, p. 90–97, 15 abr. 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.01.005>. Acesso em: 22 set. 2025.

BOUYOUCOS, George John. The Clay Ratio as a Criterion of Susceptibility of Soils to Erosion. **Journal of the american society of agronomy**, 1 set. 1935. Disponível em: <https://doi.org/10.2134/agronj1935.00021962002700090007x>. Acesso em: 15 ago. 2025.

BRISTOW, Keith L.; CAMPBELL, Gaylon S. On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 31, n. 2, p. 159–166, 1 maio 1984. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(84\)90017-0](https://doi.org/10.1016/0168-1923(84)90017-0). Acesso em: 22 jul. 2025.

CAMARGO, Ângelo Paes de *et al.* Ajuste da equação de Thornthwaite para estimar evapotranspiração potencial em climas áridos e superúmidos, com base na amplitude térmica diária. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 7, n. 2, p. 251–257, 1999. Disponível em: [http://www.leb.esalq.usp.br/agmfacil/artigos/artigos_sentelhas_1999/1999_RB_Agro_7\(2\)_251-257_ETPThTefetiva.pdf](http://www.leb.esalq.usp.br/agmfacil/artigos/artigos_sentelhas_1999/1999_RB_Agro_7(2)_251-257_ETPThTefetiva.pdf). Acesso em: 27 maio 2025.

CASTAGNA, Daniela *et al.* Evapotranspiration Assessment by Remote Sensing in Brazil with Focus on Amazon Biome: Scientometric Analysis and Perspectives for Applications in Agro-Environmental Studies. **Hydrology**, v. 11, n. 3, p. 39, Mar. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/hydrology11030039>. Acesso em: 03 jul. 2025.

CECCONELLO, Samanta Tolentino *et al.* Analysis of SWAT+ model performance: a comparative study using different software and algorithms. **Environmental Modelling & Software**, v. 188, p. 106425, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2025.106425>. Acesso em: 23 jul. 2025.

CORDEIRO, Adria Lorena de Moraes; BLANCO, Claudio José Cavalcante. Assessment of satellite products for filling rainfall data gaps in the Amazon region. **Natural Resource Modeling**, v. 34, n. 2, p. e12298, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/nrm.12298>. Acesso em: 28 jun. 2025.

DA SILVA, Vicente de Paulo Rodrigues *et al.* Simulation of stream flow and hydrological response to land-cover changes in a tropical river basin. **Catena**, v. 162, p. 166-176, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0341816217303922>. Acesso em: 14 out. 2025.

DA SILVA, Mateus Alexandre *et al.* Validação da precipitação estimada pelo produto 3B42 do satélite “Tropical Rainfall Measuring Mission” para a sub-bacia hidrográfica Paraíba do Sul, estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 28, p. 585-601, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.5380/rbclima.v28i0.75926>. Acesso em: 30 jun. 2025.

DA SILVA, Lorena Souza *et al.* Assessment of changes in land use and occupation on the hydrological regime of a basin in the west of Bahia. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 123, p. 104218, Mar. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104218>. Acesso em: 14 nov. 2025.

DANGOL, Sijal *et al.* Multivariate Calibration of the SWAT Model Using Remotely Sensed Datasets. **Remote Sensing**, v. 15, n. 9, p. 2417, Jan. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs15092417>. Acesso em: 12 nov. 2025.

EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de solos. **Súmula da X Reunião Técnica de Levantamento de Solos**. Rio de Janeiro, 1979, 83 p. (SNLCS. Série

Miscelânea, 1). Disponível em:

<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/327212/1/SNLCSMiscelania11979.pdf>. Acesso em: 29 maio 2025.

FERRAZ, Lorena Lima *et al.* Climate and land use changes impacts on streamflow in the Brazilian Cerrado basin. **Ecohydrology & Hydrobiology**, v. 25, n. 2, p. 357–366, 1 abr. 2025a. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1642359324000612>. Acesso em: 13 ago. 2025.

FERRAZ, Lorena Lima *et al.* Databases and Applications of the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) Model in Brazilian River Basins: a Review. **Environmental Modeling & Assessment**, v. 30, n. 2, p. 349–367, 1 abr. 2025b. Disponível em:

<https://doi.org/10.1007/s10666-024-10002-0>. Acesso em: 20 out. 2025.

FERREIRA, Amanda do Nascimento *et al.* Evaluation of Evapotranspiration in Brazilian Cerrado Biome Simulated with the SWAT Model. **Water**, v. 13, n. 15, p. 2037, jan. 2021.

Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w13152037>. Acesso em: 05 set. 2025.

FERREIRA, Fernanda Laurinda Valadares *et al.* Spatial–Temporal Variability of Climatic Water Balance in the Brazilian Savannah Region River Basins. **Water**, v. 15, n. 10, p. 1820, jan. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w15101820>. Acesso em: 14 set. 2025.

FERREIRA, Filipe Henrique Miranda *et al.* Climate change in the Upper Paraguay Basin and hydrological impacts on the Pantanal. **Journal of Water and Climate Change**, v. 15, n. 7, p. 3210–3221, maio 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.2166/wcc.2024.081>. Acesso em: 02 ago. 2025.

FRADE, Tatiane Gomes; SANTOS, Celso Augusto Guimarães; DA SILVA, Richarde Marques. Simulating future hydrological droughts and sediment yield by integrating different climate scenarios for a semiarid basin in Brazil. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 38, n. 9, p. 3677–3693, ago. 2024. Disponível em:

<https://doi.org/10.1007/s00477-024-02777-1>. Acesso em: 30 out. 2025.

FRANCO, Ana Clara Lazzari; BONUMÁ, Nadia Bernardi. Multi-variable SWAT model calibration with remotely sensed evapotranspiration and observed flow. **RBRH**, v. 22, p. e35, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2318-0331.011716090>. Acesso em: 25 out. 2025.

FRANCO, Ana Clara Lazzari; OLIVEIRA, Debora Yumi de; BONUMÁ, Nadia Bernardi. Comparison of single-site, multi-site and multi-variable SWAT calibration strategies.

Hydrological Sciences Journal, v. 65, n. 14, p. 2376–2389, set. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1810252>. Acesso em: 03 set. 2025.

GASCOIN, S. *et al.* Sensitivity of bare soil albedo to surface soil moisture on the moraine of the Zongo glacier (Bolivia). **Geophysical Research Letters**, v. 36, n. 2, jan. 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2008GL036377>. Acesso em: 13 nov. 2025.

HARGRAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Reference crop evapotranspiration from ambient air temperature. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 1, n. 2, p. 96–99, 1985. Disponível em: <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=26773>. Acesso em: 13 jun. 2025.

HE, Tao *et al.* Mapping Climatological Bare Soil Albedos over the Contiguous United States Using MODIS Data. **Remote Sensing**, v. 11, n. 6, p. 666, jan. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs11060666>. Acesso em: 13 abr. 2025.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual técnico de geologia**. Rio de Janeiro: IBGE, 1998. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/biblioteca-catalogo?id=27919&view=detalhes>. Acesso em: 12 ago. 2025.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual técnico de pedologia**. 3. ed., Rio de Janeiro: IBGE, 428 p., 2015. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=295017>. Acesso em: 30 jun. 2025.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual técnico de geomorfologia**. [S.l.]: Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=281612>. Acesso em: 30 jun. 2025.

JANJIC, Josip; TADIC, Lidija. Fields of Application of SWAT Hydrological Model—A Review. **Earth**, v. 4, n. 2, p. 331–344, jun. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/earth4020018>. Acesso em: 23 nov. 2025.

JIMÉNEZ-NAVARRO, Inmaculada C.; PIERSON, Don; SENENT-APARICIO, Javier. The implications of the use of ET remote sensing data for calibrating hydrological models: a comparison of single and multi-criteria calibration in SWAT+. **Earth Systems and Environment**, v. 8, n. 3, p. 831–847, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s41748-024-00438-5>. Acesso em: 13 out. 2025.

JUNQUEIRA, Rubens *et al.* Hydrological modeling using remote sensing precipitation data in a Brazilian savanna basin. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 115, p. 103773, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.103773>. Acesso em: 12 set. 2025.

LAIPELT, Leonardo *et al.* ANADEM: A Digital Terrain Model for South America. **Remote Sensing**, v. 16, n. 13, p. 2321, jan. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs16132321>. Acesso em: 02 ago. 2025.

LEE, Sangchul *et al.* Utility of Remotely Sensed Evapotranspiration Products to Assess an Improved Model Structure. **Sustainability**, v. 13, n. 4, p. 2375, jan. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su13042375>. Acesso em: 03 set. 2025.

LINS, Frederico Abraão Costa *et al.* Soil moisture and hydrological processes dynamics under climate and land use changes in a semiarid experimental basin, Brazil. **Ecohydrology & Hydrobiology**, v. 24, n. 3, p. 681–697, jul. 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S164235932400020X>. Acesso em: 05 ago. 2025.

LLERAS, Eduardo; KIRKBRIDE JR., Joseph H. Alguns aspectos da vegetação da Serra do Cachimbo. **Acta Amazonica**, v. 8, p. 51–65, 1978. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1809-43921978081051>. Acesso em: 13 set. 2025.

LOPES, Tarcio Rocha *et al.* Hydrological regime, water availability and land use/land cover change impact on the water balance in a large agriculture basin in the Southern Brazilian

Amazon. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 108, p. 103224, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103224>. Acesso em: 22 jul. 2024.

MAPBIOMAS. **Uso e Cobertura da Terra**, coleção 10. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas/>. Acesso em: 30 set. 2025.

MOURA, Larissa Brêtas *et al.* Hydrological Assessment Using the SWAT Model in the Jundiaí River Basin, Brazil: Calibration, Model Performance, and Land Use Change Impact Analysis. **Resources**, v. 14, n. 7, p. 112, jul. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/resources14070112>. Acesso em: 15 nov. 2025.

NEITSCH, Susan L. *et al.* **Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009**. Texas Water Resources Institute, 2011. Disponível em: <https://swat.tamu.edu/media/99192/swat2009-theory.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2025.

NINGTHOUJAM, Victoria; ROMEJI, Ngangbam. SWAT Model Calibration and Validation with Remotely Sensed Evapotranspiration data in Maklang-Tuyungbi-Taret Lok Ungauged Basin in Manipur, India. **Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering**, v. 49, n. 1, p. 745–761, 1 fev. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40996-024-01454-1>. Acesso em: 12 nov. 2025.

NOVAIS, Jonathan Willian Zangeski *et al.* Albedo do solo abaixo do dossel em área de *Vochysia divergens* Pohl no norte do Pantanal. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, p. 157–166, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0102-778631220150001>. Acesso em: 10 set. 2025.

PREFEITURA DE PEIXOTO DE AZEVEDO. **História do Município**. Disponível em: <https://www.peixotodeazevedo.mt.gov.br/Nossa-Cidade/Historia-do-Municipio>. Acesso em: 26 dez. 2025.

RUHOFF, Anderson *et al.* Global Evapotranspiration Datasets Assessment Using Water Balance in South America. **Remote Sensing**, v. 14, n. 11, p. 2526, jan. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs14112526>. Acesso em: 23 set. 2025.

RUNNING, S. *et al.* **MODIS/Aqua Net Evapotranspiration Gap-Filled 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V061 | NASA Earthdata**. Earth Science Data Systems, NASA, 2021. Disponível em: <https://www.earthdata.nasa.gov/data/catalog/lpcloud-myd16a2gf-061>. Acesso em: 31 out. 2025.

SAXTON, K. E.; RAWLS, W. J. Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. **Soil Science Society of America Journal**, v. 70, n. 5, p. 1569–1578, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0117>. Acesso em: 18 set. 2025.

SERRÃO, Edivaldo Afonso de Oliveira *et al.* Impacts of land use and land cover changes on hydrological processes and sediment yield determined using the SWAT model. **International Journal of Sediment Research**, v. 37, n. 1, p. 54–69, feb. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2021.04.002>. Acesso em: 16 jul. 2025.

SILVA, Ana Paula Nunes da *et al.* Albedo de superfície estimado a partir de imagens Landsat 5 – tm no semiárido brasileiro. **Revista de Geografia**, v. 27, n. 1, p. 154–168, 7 out. 2010.

Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/revistageografia/article/view/228802>. Acesso em: 03 jun. 2025.

SIQUEIRA, Paula Prado *et al.* Effects of climate and land cover changes on water availability in a Brazilian Cerrado basin. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 37, p. 100931, out. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100931>. Acesso em: 26 jul. 2025.

SOBOL, Ilya M. Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates. **Mathematics and computers in simulation**, v. 55, n. 1-3, p. 271-280, 2001. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378475400002706>. Acesso em: 12 ago. 2025.

SOUZA, Adilson Pacheco de *et al.* Classificação climática e balanço hídrico climatológico no estado de Mato Grosso. **Nativa**, v. 1, n. 1, p. 34-43, 15 nov. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.31413/nativa.v1i1.1334>. Acesso em: 24 jan. 2025.

SOUZA, Adilson Pacheco de *et al.* Global radiation by simplified models for the state of Mato Grosso, Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 52, p. 215-227, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2017000400001>. Acesso em: 22 abr. 2025.

TANAKA, Adriana Aki *et al.* Evapotranspiração de referência estimada por modelos simplificados para o Estado do Mato Grosso. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 2, p. 91-104, fev. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000200001>. Acesso em: 26 abr. 2025.

TOLSON, Bryan A.; SHOEMAKER, Christine A. Dynamically dimensioned search algorithm for computationally efficient watershed model calibration. **Water Resources Research**, v. 43, n. 1, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2005WR004723>. Acesso em: 13 ago. 2025.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**, 4. ed.; ABRH: Porto Alegre, Brasil, 2012; 944 p.

USDA/NRCS, UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Soil Texture Calculator**, [S.d.]. Disponível em: <https://www.nrcs.usda.gov/resources/education-and-teaching-materials/soil-texture-calculator>. Acesso em: 15 out. 2025.

USDA/NRCS, UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Natural Resources Conservation Service. Hydrologic soil groups, chapter 7. In: **National engineering handbook, part 630**. [S.l.: S.n.]. p. 31. Disponível em: <https://directives.nrcs.usda.gov/sites/default/files2/1712930597/11905.pdf>. Acesso em: 09 jun. 2025.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia Aplicada**. São Paulo: McGraw-Hill, 1975.

ZHENG, Dongxue *et al.* A novel remote sensing-based calibration and validation method for distributed hydrological modelling in ungauged basins. **Journal of Hydrology**, v. 658, p. 133119, 1 set. 2025. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169425004573>. Acesso em: 12 nov. 2025.

APÊNDICE A

Tabela 14. Lista das amostras de perfil de solos do Sistema de Informação de Solos Brasileiros (SiSB) utilizados na modelagem.

Solo	Referência SiSB	Código de identificação
Argissolo Vermelho-Amarelo	Perfil103	PVAd
Gleissolo Háptico	Perfil 47	GXbd
Latossolo Vermelho-Amarelo	Perfil 188	LVAd
Latossolo Vermelho-Amarelo	Perfil 187	LVAd
Neossolo Litólico	Perfil 192	RLd
Neossolo Quartzarênico	Perfil 97	RQo
Nitossolo Vermelho	Perfil 175	NVd
Plintossolo Pétrico	Perfil 265	FFc
Plintossolo Pétrico	Perfil 156	FFc

Tabela 15. Variáveis e respectivos valores dos solos da bacia hidrográfica do rio Peixoto de Azevedo.

Parâmetro	Valores								
OBJECTID	1	3	4	6	7	8	9	10	11
MUID	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SEQN	1	3	4	6	7	8	9	10	11
SNAM	BSVG	PVAd	GXbd	LVAd	RLd	RQo	NVd	FFc	WATR
S5ID	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CMPPCT	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NLAYERS	0	7	5	6	1	3	8	5	0
HYDGRP	0	B	B	C	B	A	C	B	0
SOL_ZMX	0	1650	1500	1700	250	2200	1600	1200	0
ANION_EXCL	0	0.56	0.55	0.55	0.52	0.57	0.57	0.57	0
TEXTURE	0	Sandy_Clay	Clay_Loam	Clay	Sandy_Loam	Sandy_Loam	Clay	Clay_Loam	0
SOL_Z1	0	150	100	150	250	400	100	200	0
SOL_BD1	0	1.41145	1.3011	1.3644	1.3788	1.4763	1.41115	1.4913	0
SOL_AWC1	0	0.14	0.14	0.2	0.14	0.06	0.14	0.14	0
SOL_K1	0	30.16	166.596	3.35967	95.58033	217.4796	57.90134	20.32399	0
SOL_CBN1	0	16	28	20	20	10	16	7	0
CLAY1	0	26.7	31.4	48.8	20	5	27.3	29	0
SILT1	0	11.5	42.7	14.7	21.4	1.5	34.6	33.3	0
SAND1	0	61.8	25.9	36.5	58.6	93.5	38.1	37.7	0
ROCK1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SOL_ALB1	0	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0
USLE_K1	0	0.027453	0.021847	0.010492	0.04	0.19	0.02663	0.024483	0
SOL_EC1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SOL_Z2	0	500	200	300	0	1600	250	500	0
SOL_BD2	0	1.45375	1.44195	1.4271	0	1.5208	1.4438	1.4793	0
SOL_AWC2	0	0.14	0.14	0.2	0	0.06	0.6	0.14	0
SOL_K2	0	13.37	18.51	2.57	0	173.06	103.02	15.71	0
SOL_CBN2	0	11	12	13	0	5	13	8	0
CLAY2	0	32.1	37.7	49.4	0	6	16	35	0
SILT2	0	13.7	32.1	16.4	0	3.2	39.2	35.6	0
SAND2	0	54.2	30.2	34.2	0	90.8	44.8	29.4	0
ROCK2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SOL_ALB2	0	0.13	0.13	0.13	0	0.13	0.13	0.13	0
USLE_K2	0	0.021153	0.016525	0.010243	0	0.156667	0.0525	0.018571	0
SOL_EC2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SOL_Z3	0	650	600	600	0	2200	500	700	0
SOL_BD3	0	1.4704	1.50565	1.4626	0	1.54695	1.49355	1.50435	0
SOL_AWC3	0	0.14	0.14	0.2	0	0.06	0.14	0.14	0
SOL_K3	0	8.673139	10.78315	1.564261	0	145.4823	4.92958	7.930711	0
SOL_CBN3	0	9	5	9	0	2	6	5	0
CLAY3	0	34.8	36.3	50.4	0	7.7	42.5	38.9	0
SILT3	0	14	36.3	15.5	0	2.8	25.1	34.4	0
SAND3	0	51.2	23.1	34.1	0	89.5	32.4	26.7	0
ROCK3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SOL_ALB3	0	0.13	0.13	0.13	0	0.13	0.13	0.13	0.13

USLE_K3	0	0.018736	0.016364	0.009841	0	0.11987	0.013529	0.015707	0
SOL_EC3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SOL_Z4	0	800	900	1000	0	0	650	950	0
SOL_BD4	0	1.48515	1.53495	1.48305	0	0	1.5066	1.50475	0
SOL_AWC4	0	0.14	0.14	0.2	0	0	0.2	0.14	0
SOL_K4	0	3.453126	8.454029	2.518675	0	0	1.160119	7.048966	0
SOL_CBN4	0	7	2	7	0	0	4	5	0
CLAY4	0	41.3	31.7	45.5	0	0	52.4	38.1	0
SILT4	0	14.5	31.7	17	0	0	17.9	28.7	0
SAND4	0	44.2	19.2	37.5	0	0	29.7	33.2	0
ROCK4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SOL_ALB4	0	0.13	0.13	0.13	0	0	0.13	0.13	0.13
USLE_K4	0	0.014213	0.016057	0.011978	0	0	0.009084	0.016247	0
SOL_EC4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SOL_Z5	0	1000	1500	1400	0	0	800	1200	0
SOL_BD5	0	1.4929	1.5437	1.4945	0	0	1.51415	1.51175	0
SOL_AWC5	0	0.14	0.14	0.14	0	0	0.2	0.14	0
SOL_K5	0	2.335922	6.473788	4.358308	0	0	0.766712	3.492953	0
SOL_CBN5	0	6	1	6	0	0	3	4	0
CLAY5	0	43.8	32.2	40.6	0	0	55.3	42.1	0
SILT5	0	14.4	32.2	19	0	0	16.4	21.9	0
SAND5	0	41.8	19.2	40.4	0	0	28.3	36	0
ROCK5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SOL_ALB5	0	0.13	0.13	0.13	0	0	0.13	0.13	0
USLE_K5	0	0.012831	0.015963	0.014631	0	0	0.008083	0.013753	0
SOL_EC5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SOL_Z6	0	1350	0	1700	0	0	1000	0	0
SOL_BD6	0	1.50335	0	1.50145	0	0	1.5415	0	0
SOL_AWC6	0	0.14	0	0.14	0	0	0.2	0	0
SOL_K6	0	3.150192	0	2.10097	0	0	0.779409	0	0
SOL_CBN6	0	5	0	5	0	0	0.2	0	0
CLAY6	0	40.9	0	44.7	0	0	51	0	0
SILT6	0	14.5	0	15.6	0	0	16.8	0	0
SAND6	0	44.6	0	39.7	0	0	32.2	0	0
ROCK6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SOL_ALB6	0	0.13	0	0.13	0	0	0.13	0	0
USLE_K6	0	0.01445	0	0.012371	0	0	0.009608	0	0
SOL_EC6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SOL_Z7	0	1650	0	0	0	0	1400	0	0
SOL_BD7	0	1.52255	0	0	0	0	1.53035	0	0
SOL_AWC7	0	0.2	0	0	0	0	0.14	0	0
SOL_K7	0	3.715027	0	0	0	0	3.30036	0	0
SOL_CBN7	0	3	0	0	0	0	2	0	0
CLAY7	0	38.5	0	0	0	0	40.9	0	0
SILT7	0	14.3	0	0	0	0	24	0	0
SAND7	0	47.2	0	0	0	0	35.1	0	0
ROCK7	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SOL_ALB7	0	0.13	0	0	0	0	0.13	0	0
USLE_K7	0	0.015974	0	0	0	0	0.01445	0	0
SOL_EC7	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SOL_Z8	0	0	0	0	0	0	1600	0	0
SOL_BD8	0	0	0	0	0	0	1.53795	0	0
SOL_AWC8	0	0	0	0	0	0	0.14	0	0
SOL_K8	0	0	0	0	0	0	2.22259	0	0
SOL_CBN8	0	0	0	0	0	0	1	0	0
CLAY8	0	0	0	0	0	0	43.7	0	0
SILT8	0	0	0	0	0	0	23.6	0	0
SAND8	0	0	0	0	0	0	32.7	0	0
ROCK8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SOL_ALB8	0	0	0	0	0	0	0.13	0	0
USLE_K8	0	0	0	0	0	0	0.012883	0	0
SOL_EC8	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabela 16. Dados de ET_0 utilizados para a calibração da vazão líquida da bacia hidrográfica do rio Peixoto de Azevedo, considerando os anos de 2011, 2012 e 2013 para o aquecimento.

Data	Penman-Montheith	Camargo ¹	MOD16A2 ¹	Data	Penman-Montheith	Camargo ¹	MOD16A2 ¹
01/01/2011	109,56	112,49	102,08	01/01/2016	93,61	114,5	103,7
01/02/2011	93,8	94,56	101,75	01/02/2016	136,06	115,47	117,76
01/03/2011	96,13	97,46	110,35	01/03/2016	107,36	103,77	128,35
01/04/2011	101,38	83,21	110,23	01/04/2016	111,55	88,35	118,51
01/05/2011	94,95	67,9	113,01	01/05/2016	104,72	76,38	108,03

01/06/2011	95,56	58,47	106,65	01/06/2016	92,91	61,15	107,33
01/07/2011	104,36	63,71	87,28	01/07/2016	105,05	64,61	74,92
01/08/2011	123,51	83,67	36,08	01/08/2016	114,35	83,93	35,5
01/09/2011	122,49	99,41	30,14	01/09/2016	123,7	96,68	41,38
01/10/2011	108,44	107,48	63,62	01/10/2016	118,02	108,5	84,81
01/11/2011	96,62	101,29	109,78	01/11/2016	97,57	104,87	105,76
01/12/2011	101,41	105,39	124,5	01/12/2016	92,55	105,8	127,8
01/01/2012	86,91	102,78	104,63	01/01/2017	98,47	106,32	112,12
01/02/2012	95,06	96,17	114,02	01/02/2017	79,63	93,23	108,51
01/03/2012	101,53	98,35	112,88	01/03/2017	88,05	99,46	124,05
01/04/2012	90,17	85,73	103,85	01/04/2017	82,21	85,72	114,03
01/05/2012	88,61	71,51	106,36	01/05/2017	88,61	77,88	111,32
01/06/2012	97,12	61,76	98,92	01/06/2017	82,28	61,44	110,66
01/07/2012	110,57	64,24	108,78	01/07/2017	89,97	60,95	82,36
01/08/2012	133,03	78,64	56,83	01/08/2017	90,21	86,43	38,51
01/09/2012	105,03	98,1	36,03	01/09/2017	90,32	101,12	33,83
01/10/2012	113,55	107,03	77,8	01/10/2017	111,26	111,17	58,11
01/11/2012	86,98	102,15	110,35	01/11/2017	102,22	106,34	94,32
01/12/2012	102,43	107,41	115,77	01/12/2017	87,25	106,31	129,25
01/01/2013	79,72	105,07	112,92	01/01/2018	97,03	106,86	112,93
01/02/2013	86,47	95,59	104,67	01/02/2018	69,09	91,6	112,04
01/03/2013	96,33	100,37	118,08	01/03/2018	100,12	102,18	129,76
01/04/2013	93,19	84,4	110,63	01/04/2018	82,62	84,41	113,78
01/05/2013	101,62	74,19	117,81	01/05/2018	91,12	73,8	114,83
01/06/2013	100,64	64,27	105,88	01/06/2018	87,87	60,5	108,31
01/07/2013	110,3	65,65	102,71	01/07/2018	93,76	64,75	61,05
01/08/2013	127,26	79,5	44,56	01/08/2018	98,84	87,6	37,45
01/09/2013	119,08	94,78	44,05	01/09/2018	103,67	100,05	37,96
01/10/2013	93,14	105,23	91,88	01/10/2018	109,89	109,98	86,08
01/11/2013	79,09	100,35	114,15	01/11/2018	93,01	105,66	117,5
01/12/2013	79,8	104,26	122,62	01/12/2018	91	104,91	123,37
01/01/2014	89,28	102,73	112,88	01/01/2019	97,93	107,91	112,93
01/02/2014	73,82	91,95	105,76	01/02/2019	86,12	98,28	109,7
01/03/2014	92,15	97,24	123,03	01/03/2019	90,54	101,81	121,17
01/04/2014	95,06	84,27	113,73	01/04/2019	82,56	87,21	116,8
01/05/2014	92,16	73,85	111,32	01/05/2019	87,33	76,09	121,07
01/06/2014	89,41	60,58	107,23	01/06/2019	85,86	63,52	110,39
01/07/2014	104,05	66,84	86,34	01/07/2019	92,76	67,69	81,63
01/08/2014	127,17	82,8	41,48	01/08/2019	95,62	84,69	35,71
01/09/2014	130,51	98,03	41,39	01/09/2019	98,32	105,24	30,54
01/10/2014	95,57	108,25	58,92	01/10/2019	102,55	107,49	75,35
01/11/2014	90,21	105,9	107,78	01/11/2019	105,17	108,41	73,53
01/12/2014	88,62	106,37	119,6	01/12/2019	101,71	111,21	122,75
01/01/2015	100,23	105,92	108,46	01/01/2020	101,5	110,42	112,98
01/02/2015	78,1	92,75	104,16	01/02/2020	78,86	99,15	113,67
01/03/2015	95,58	97,01	116,46	01/03/2020	94,65	101,59	114,72
01/04/2015	95,8	83,61	105,13	01/04/2020	84,85	85,97	107,09
01/05/2015	75,54	73,35	103,52	01/05/2020	87,99	75,4	113,88
01/06/2015	87,59	62,48	109,96	01/06/2020	94,01	66,07	109,18
01/07/2015	107,44	69,36	102,56	01/07/2020	111,39	73,43	100,18
01/08/2015	126,28	88,22	47,01	01/08/2020	125,33	92,25	42,53
01/09/2015	119,59	102,37	39,36	01/09/2020	125,94	109,78	34,5
01/10/2015	90,75	111,02	49,87	01/10/2020	123,15	116,69	48,97
01/11/2015	101,7	114,21	91,9	01/11/2020	111,28	112,15	100,36
01/12/2015	114,72	121,41	121,47	01/12/2020	110,34	107,44	120,76

¹Valores normalizados de acordo com o método de Penman-Monteith.

5. CONCLUSÃO GERAL

Esta tese evidencia um paradoxo fundamental na modelagem hidrológica nacional: embora o Brasil apresente um cenário altamente promissor para a aplicação do modelo SWAT e de técnicas de sensoriamento remoto, regiões de importância global, como o bioma Amazônia, permanecem cientificamente sub-representadas. A análise cientométrica revelou que a produção acadêmica nacional está fortemente concentrada nas bacias do Sudeste e do Sul, o que reflete a distribuição histórica dos centros de excelência e dos programas de pós-graduação. Paralelamente, constatou-se que o uso do SWAT no país ainda é altamente dependente da transferência tecnológica de instituições norte-americanas, carecendo de integração sul-americana que consolide e parametrize parametrizações regionais unificadas.

No que tange à evapotranspiração (ET_0) na Amazônia, o produto orbital do MODIS (MOD16A2) consolidou-se como a ferramenta predominante. Contudo, a aplicação do produto na calibração da bacia hidrográfica do rio Peixoto de Azevedo não apenas falhou em aprimorar a simulação, mas também degradou o desempenho estatístico em relação à calibração univariada tradicional (baseada apenas na vazão líquida). Esse achado alerta para os riscos do uso indiscriminado de dados orbitais como paliativo à escassez de dados terrestres na Amazônia. A complexidade algorítmica do SWAT exige que suas bases de dados de entrada tenham boa qualidade; do contrário, a ferramenta reproduz e amplia as incertezas na modelagem.

Por fim, a pesquisa demonstra que é essencial recorrer a métodos baseados na física do ambiente para garantir previsões confiáveis. A calibração multivariada apresentou os melhores resultados ao utilizar dados climáticos locais, com destaque especial para o método de Penman-Monteith. A principal vantagem desse método de calibração multivariado é que ele impõe limites físicos reais ao modelo. Em vez de apenas acertar a vazão líquida final do rio no exutório, o uso da ET_0 obrigou o programa a distribuir a água por todas as etapas do balanço hídrico.