

Quantificação da evapotranspiração real por sensoriamento remoto em bacias hidrográficas: modelos, desempenho e limitações**Quantification of actual evapotranspiration by remote sensing in river basins: models, performance and limitations****Cuantificación de la evapotranspiración real mediante teledetección en cuencas hidrográficas: modelos, desempeño y limitaciones**

DOI: 10.5281/zenodo.23318228

Recebido: 09 out 2026

Aprovado: 10 out 2026

Aleffy Gil Pereira da Silva

Mestrando em Engenharia Civil e Ambiental

Instituição de formação: Universidade Federal da Paraíba

Endereço: João Pessoa, Paraíba, Brasil.

Orcid ID: <https://orcid.org/0009-0002-7454-699X>E-mail: eng.aleffy@gmail.com**RESUMO**

A evapotranspiração real representa a maior parcela de saída de água das bacias hidrográficas continentais, porém sua medição direta é cara, pontual e pouco disponível. Objetivou-se analisar, na literatura científica recente, os modelos de sensoriamento remoto empregados na quantificação da evapotranspiração real em bacias hidrográficas, bem como o desempenho alcançado e as limitações relatadas. Trata-se de revisão integrativa da literatura, conduzida nas bases Scopus, Web of Science, ScienceDirect, Portal de Periódicos Capes e SciELO, com recorte temporal de 2021 a 2026 e relato orientado pela recomendação PRISMA 2020. Após as etapas de identificação, triagem e elegibilidade, 18 estudos compuseram a amostra final. Os resultados evidenciaram quatro grupos de abordagens: modelos de balanço de energia à superfície de fonte única, modelos de duas fontes, métodos apoiados em índices de vegetação e algoritmos de aprendizado de máquina. Os erros quadráticos médios relatados em escala diária situaram-se predominantemente entre 0,26 e 0,97 milímetro por dia, com coeficientes de determinação entre 0,79 e 0,95, enquanto avaliações em escala mensal registraram erro absoluto médio próximo a 17 por cento do valor observado. As limitações mais recorrentes foram a cobertura de nuvens, a necessidade de calibração local, a heterogeneidade do pixel e a escassez de medições de campo para validação. Conclui-se que nenhum modelo é universalmente superior e que a escolha deve considerar o bioma, a escala e a disponibilidade de dados auxiliares.

Palavras-chave: Balanço de energia. Balanço hídrico. Gestão da água. Imagens de satélite. Superfície terrestre.**ABSTRACT**

Actual evapotranspiration represents the largest water output from continental river basins, yet its direct measurement is expensive, site-specific and scarcely available. This study aimed to analyze, in recent scientific literature, the remote sensing models used to quantify actual evapotranspiration in river basins, as well as the performance achieved and the limitations reported. This is an integrative literature review conducted in the Scopus, Web of Science, ScienceDirect, Capes Journal Portal and SciELO databases, covering the period from 2021 to 2026, with reporting guided by the PRISMA 2020 statement. After identification, screening and eligibility assessment, 18 studies composed the final sample. The results revealed four groups of approaches: single source surface energy balance models, two source models, methods supported by vegetation indices and machine learning algorithms. Root mean

square errors reported at the daily scale were predominantly between 0.26 and 0.97 millimeter per day, with coefficients of determination between 0.79 and 0.95, while monthly scale assessments recorded mean absolute error close to 17 percent of the observed value. The most recurrent limitations were cloud cover, the need for local calibration, pixel heterogeneity and the scarcity of field measurements for validation. It is concluded that no model is universally superior and that the choice must consider the biome, the scale and the availability of ancillary data.

Keywords: Energy balance. Land surface. Satellite imagery. Water balance. Water management.

RESUMEN

La evapotranspiración real representa la mayor salida de agua de las cuencas continentales, pero su medición directa es costosa, puntual y poco disponible. Se objetivó analizar, en la literatura científica reciente, los modelos de teledetección empleados en la cuantificación de la evapotranspiración real en cuencas hidrográficas, así como el desempeño alcanzado y las limitaciones reportadas. Se trata de una revisión integradora de la literatura, realizada en las bases Scopus, Web of Science, ScienceDirect, Portal de Periódicos Capes y SciELO, con recorte temporal de 2021 a 2026 y reporte orientado por la recomendación PRISMA 2020. Tras las etapas de identificación, cribado y elegibilidad, 18 estudios compusieron la muestra final. Los resultados evidenciaron cuatro grupos de enfoques: modelos de balance de energía en superficie de fuente única, modelos de dos fuentes, métodos apoyados en índices de vegetación y algoritmos de aprendizaje automático. Los errores cuadráticos medios reportados en escala diaria se situaron predominantemente entre 0,26 y 0,97 milímetros por día, con coeficientes de determinación entre 0,79 y 0,95, mientras que las evaluaciones en escala mensual registraron un error absoluto medio cercano al 17 por ciento del valor observado. Las limitaciones más recurrentes fueron la cobertura de nubes, la necesidad de calibración local, la heterogeneidad del píxel y la escasez de mediciones de campo para validación. Se concluye que ningún modelo es universalmente superior y que la elección debe considerar el bioma, la escala y la disponibilidad de datos auxiliares.

Palabras clave: Balance de energía. Balance hídrico. Gestión del agua. Imágenes de satélite. Superficie terrestre.

1. INTRODUÇÃO

A evapotranspiração real corresponde à transferência conjunta de água do solo e da vegetação para a atmosfera e constitui, na maior parte das bacias hidrográficas continentais, o maior termo de saída do balanço hídrico, frequentemente superior ao escoamento superficial. Dessa posição decorre uma consequência prática imediata: erros na estimativa da evapotranspiração propagam-se para a quantificação da água efetivamente disponível, comprometendo a outorga de uso, o dimensionamento de sistemas de irrigação e a calibração de modelos hidrológicos. O relatório mundial sobre o desenvolvimento dos recursos hídricos reforça que a carência de informação hidrológica confiável amplia a vulnerabilidade social e dificulta a mediação de conflitos pelo uso da água (Unesco, 2024).

A dificuldade reside na natureza da grandeza. Diferentemente da precipitação ou do nível de um rio, a evapotranspiração não é observável de forma direta e simples. Os métodos de referência, como a covariância de vórtices turbulentos e os lisímetros de pesagem, fornecem medidas de elevada acurácia, mas representam áreas restritas, exigem operação especializada e apresentam custo elevado de instalação e manutenção. O resultado é uma rede de observação esparsa, concentrada em poucos sítios experimentais, cuja representatividade para bacias inteiras é limitada pela heterogeneidade do uso e da cobertura do solo.

No Brasil, os relatórios de conjuntura dos recursos hídricos destacam a diversidade de regimes hidrológicos e a necessidade de qualificar as estimativas de disponibilidade em bacias com baixa densidade de monitoramento (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2025). Análises cienciométricas da produção nacional mostram que a pesquisa sobre evapotranspiração por sensoriamento remoto cresceu de modo acentuado no período recente, porém com concentração em determinadas regiões e forte dependência de poucos produtos orbitais (Castagna *et al.*, 2024).

O sensoriamento remoto oferece a alternativa mais consolidada para superar essa limitação, pois converte observações de radiância em estimativas espacialmente distribuídas de fluxo de calor latente. A família mais difundida de métodos resolve o balanço de energia à superfície, obtendo o fluxo de calor latente como termo residual entre o saldo de radiação, o fluxo de calor no solo e o fluxo de calor sensível. Pertencem a essa família algoritmos de fonte única, que tratam solo e vegetação como uma superfície homogênea, e modelos de duas fontes, que separam os componentes. Revisões especializadas apontam que esses modelos atingiram maturidade metodológica, mas que nenhum deles se mostra adequado a todas as condições ambientais (Derardja *et al.*, 2024).

Ao lado dessa família, consolidaram-se abordagens apoiadas em índices de vegetação, produtos globais de evapotranspiração distribuídos de forma operacional e, mais recentemente, algoritmos de aprendizado de máquina treinados com dados de torres de fluxo. A multiplicação de alternativas trouxe um problema novo: a literatura passou a relatar desempenhos em métricas, escalas temporais e condições ambientais muito distintas, o que dificulta a comparação e a escolha fundamentada de um método para determinada bacia.

Essa fragmentação justifica uma síntese que organize, em um mesmo quadro, os modelos utilizados, as magnitudes de erro efetivamente alcançadas e as limitações relatadas pelos próprios autores. A revisão integrativa é o desenho apropriado para esse propósito, pois admite a combinação de estudos com delineamentos distintos e permite identificar padrões, contradições e lacunas em corpos de conhecimento heterogêneos (Almeida *et al.*, 2024).

Formulou-se, assim, a seguinte questão norteadora: quais modelos de sensoriamento remoto têm sido empregados na quantificação da evapotranspiração real em bacias hidrográficas, com que desempenho e com quais limitações, segundo a literatura científica publicada entre 2021 e 2026? O objetivo geral consistiu em analisar as evidências recentes sobre a quantificação da evapotranspiração real por sensoriamento remoto em bacias hidrográficas. Como objetivos específicos, buscou-se caracterizar os estudos quanto à origem geográfica e ao delineamento, identificar os modelos, sensores e produtos

utilizados, sintetizar as medidas de desempenho relatadas e sistematizar as fontes de incerteza e as lacunas de pesquisa.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

O referencial que sustenta esta revisão organiza-se em três eixos: a função da evapotranspiração real no balanço hídrico de bacias, os fundamentos físicos dos modelos de balanço de energia à superfície e a infraestrutura de produtos globais, plataformas computacionais e algoritmos de aprendizado estatístico que viabiliza sua aplicação em larga escala.

2.1 A evapotranspiração real no balanço hídrico de bacias

Em uma bacia hidrográfica, o balanço hídrico relaciona a precipitação às saídas por escoamento e por evapotranspiração e à variação do armazenamento. Como a evapotranspiração costuma responder por parcela majoritária das saídas, ela funciona como termo de fechamento: quando mal estimada, transfere todo o seu erro para os demais componentes. Avaliações conduzidas em 931 bacias de grande porte evidenciaram a severidade desse problema, pois a eficiência mediana do fechamento do balanço com produtos orbitais foi praticamente nula e nenhuma combinação de produtos mostrou-se globalmente superior às demais (Michailovsky *et al.*, 2023).

O desempenho do fechamento mostrou-se condicionado às características ambientais. Bacias tropicais apresentaram os melhores resultados e bacias áridas, os piores, enquanto cobertura de neve, altitude e latitude associaram-se a maior dificuldade de fechamento (Michailovsky *et al.*, 2023). Em regiões montanhosas, contudo, a avaliação de oito produtos globais contra estimativas de balanço hídrico indicou desempenho satisfatório na escala mensal, com destaque para um algoritmo simplificado de balanço de energia que alcançou eficiência de Nash e Sutcliffe de 0,80 e eficiência de Kling e Gupta de 0,90 (Jiang; Liu, 2021).

A dimensão aplicada desse debate aparece com clareza em bacias sob forte competição pelo uso da água. Em área úmida protegida do sul da Espanha, séries de evapotranspiração revelaram aumento nas zonas agrícolas intensificadas e tendência negativa acentuada nas zonas alagadas, padrão interpretado como desvio de água em favor da irrigação e em detrimento dos ecossistemas naturais, com agravamento durante um período de seca em que a precipitação caiu 16 por cento (Moyano *et al.*, 2025).

2.2 Modelos de balanço de energia à superfície

Os modelos de balanço de energia estimam o fluxo de calor latente como resíduo da equação que relaciona o saldo de radiação ao fluxo de calor no solo e ao fluxo de calor sensível. A temperatura da superfície terrestre, obtida na faixa do infravermelho termal, é a variável central porque governa a estimativa do fluxo de calor sensível. Nos modelos de fonte única, solo e dossel são tratados como superfície única, enquanto os modelos de duas fontes separam a evaporação do solo da transpiração da vegetação (Derardja *et al.*, 2024).

A aplicação desses algoritmos em bacias reais tem produzido resultados consistentes, ainda que com vieses característicos. Em bacia árida do noroeste da China, estimativas de um modelo de fonte única apresentaram coeficiente de determinação de 0,85 frente ao método de Penman e Monteith, com superestimação em relação a um produto orbital de referência e com o índice de vegetação por diferença normalizada identificado como principal controlador da variação espacial (Chen *et al.*, 2023). Em arrozais indianos, o mesmo tipo de algoritmo alcançou erro quadrático médio de 0,965 milímetro por dia e coeficiente de determinação de 0,79, com os maiores valores de evapotranspiração no estágio de meia estação (Behura *et al.*, 2026).

A comparação direta entre famílias de algoritmos tem revelado que a complexidade adicional nem sempre se converte em ganho de acurácia. Em esquema de irrigação da África do Sul, a avaliação de quatro métodos contra lisímetro de pesagem apontou melhor desempenho de uma abordagem baseada em índices de vegetação, com coeficiente de determinação de 0,85 e erro quadrático médio de 0,58 milímetro por dia, seguida de perto por um algoritmo de balanço de energia de fonte única, enquanto um método fundado em índice de estresse hídrico apresentou desempenho insatisfatório (Ratshiedana *et al.*, 2026).

Os vieses também variam conforme o bioma. No semiárido brasileiro, a aplicação de um algoritmo de fonte única em áreas de Caatinga resultou em maior afastamento em relação às observações de campo do que o produto orbital de referência, embora tenha capturado melhor as diferenças espaciais da superfície, e o saldo de radiação estimado apresentou coeficiente de determinação de 0,93 frente às medições (Oliveira *et al.*, 2023).

2.3 Produtos globais, plataformas em nuvem e aprendizado de máquina

A distribuição operacional de produtos de evapotranspiração reduziu a barreira de entrada para órgãos gestores. A avaliação de um conjunto de modelos distribuídos de forma aberta, confrontado com 152 estações de campo, registrou erro absoluto médio de 15,8 milímetros por mês em áreas agrícolas, equivalente a cerca de 17 por cento do valor observado, com coeficiente de determinação de 0,90 e

desempenho do conjunto superior ao de cada modelo isolado (Volk *et al.*, 2024). O mesmo estudo documentou superestimação em sítios florestados e maior variabilidade em formações naturais abertas, o que delimita o alcance da aplicação direta desses produtos.

As plataformas de computação em nuvem ampliaram a escala temporal das análises. A implementação de um algoritmo de balanço de energia em ambiente de nuvem permitiu reconstituir dezessete anos de evapotranspiração sazonal em áreas irrigadas do noroeste da China, com correlações superiores a 0,7 frente a observações de campo e identificação de tendência decrescente do índice de estresse hídrico, atribuída à difusão de técnicas de irrigação economizadoras (Zhao *et al.*, 2024). Em bacia fechada do Irã, o acoplamento entre um modelo de balanço de energia de código aberto e técnicas de preenchimento de falhas gerou mapas mensais contínuos a 30 metros de resolução, com coeficiente de determinação de 0,93 em áreas agrícolas (Pareeth; Karimi, 2023).

Os métodos de aprendizado de máquina entraram no campo por duas vias principais. A primeira é a estimativa direta a partir de variáveis espectrais e meteorológicas, com desempenho dependente da zona climática e do conjunto de preditores adotado (Du *et al.*, 2024). A segunda é a espacialização de medições pontuais de torres de fluxo para a escala regional, estratégia que, combinada à fusão de dados de diferentes sensores, alcançou correlação de 0,90 e erro quadrático médio de 0,66 milímetro por dia em área agrícola homogênea (Zhu *et al.*, 2025). Experiências brasileiras com redes neurais aplicadas a dados espectrais, por outro lado, relataram acurácias entre 68,18 e 77,42 por cento e reconheceram que as previsões ainda carecem de refinamento antes de substituir os algoritmos físicos (Nery *et al.*, 2025).

3. METODOLOGIA

Trata-se de uma revisão integrativa da literatura, método que permite a síntese de estudos com delineamentos distintos em torno de uma mesma questão e possibilita a identificação de padrões, de contradições e de lacunas em corpos de conhecimento heterogêneos (Almeida *et al.*, 2024). O percurso metodológico seguiu seis etapas: elaboração da questão norteadora, definição dos critérios de inclusão e de exclusão, busca nas bases de dados, avaliação dos estudos recuperados, extração e análise dos dados e apresentação da síntese. O relato das etapas de identificação, triagem e elegibilidade foi orientado pela recomendação PRISMA 2020 (Page *et al.*, 2021).

A questão norteadora foi assim definida: quais modelos de sensoriamento remoto têm sido empregados na quantificação da evapotranspiração real em bacias hidrográficas, com que desempenho e com quais limitações, segundo a literatura científica publicada entre 2021 e 2026? A pergunta foi estruturada em três componentes: população, correspondente a bacias hidrográficas, sub-bacias e áreas de

contribuição hidrológica; interesse, correspondente ao emprego de dados orbitais para estimar a evapotranspiração real; e contexto, correspondente à avaliação de desempenho e à gestão de recursos hídricos.

A busca foi realizada em cinco bases: Scopus, Web of Science, ScienceDirect, Portal de Periódicos da Capes e SciELO. Foram empregados descritores em português, inglês e espanhol, combinados por operadores booleanos. A estratégia central, adaptada à sintaxe de cada base, correspondeu à seguinte expressão: (“actual evapotranspiration” OR “latent heat flux” OR “water consumption”) AND (“remote sensing” OR satellite OR “earth observation”) AND (basin OR catchment OR watershed). Os equivalentes em português incluíram evapotranspiração real, fluxo de calor latente, sensoriamento remoto, balanço de energia e bacia hidrográfica. As buscas foram executadas entre 12 de agosto e 2 de setembro de 2026.

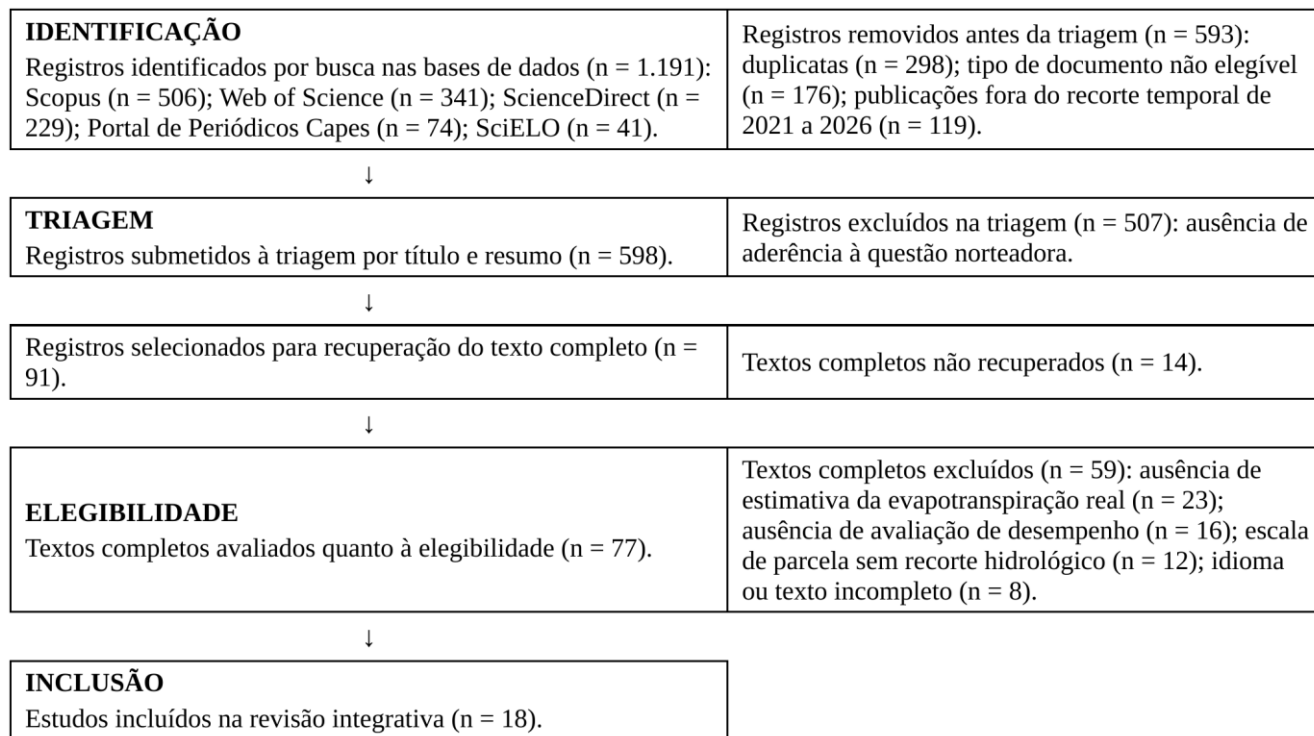
Foram adotados como critérios de inclusão: artigos completos publicados em periódicos revisados por pares entre 2021 e 2026; textos redigidos em português, inglês ou espanhol; estudos cujo objeto central fosse a estimativa da evapotranspiração real por sensoriamento remoto em bacias hidrográficas ou em unidades territoriais nelas inseridas; e trabalhos que apresentassem medidas de desempenho, procedimentos de validação ou síntese da literatura. Foram excluídos: estudos restritos à evapotranspiração de referência ou potencial, sem estimativa da evapotranspiração real; trabalhos conduzidos exclusivamente em escala de parcela, sem recorte hidrológico; pesquisas sem qualquer avaliação de desempenho; resumos de eventos, capítulos de livro, editoriais, cartas, teses e dissertações; publicações sem acesso ao texto completo; e duplicatas entre bases.

O processo de seleção ocorreu em quatro fases. Na identificação, foram recuperados 1.191 registros. A remoção prévia à triagem eliminou 593 registros, sendo 298 duplicatas, 176 documentos de tipo não elegível e 119 publicações fora do recorte temporal. Na triagem por título e resumo, 598 registros foram avaliados e 507 foram excluídos por não atenderem à questão norteadora. Dos 91 registros selecionados para recuperação, 14 não tiveram o texto completo acessível. Entre os 77 textos completos avaliados quanto à elegibilidade, 59 foram excluídos pelos motivos detalhados na Figura 1, resultando em 18 estudos incluídos na síntese final.

A extração dos dados foi realizada em instrumento próprio, estruturado com os seguintes campos: autoria, ano de publicação, periódico, país ou região do estudo, delineamento, modelo de estimativa empregado, sensores e produtos orbitais utilizados, método de validação, métricas de desempenho e limitações relatadas. A análise seguiu procedimento descritivo e interpretativo, com agrupamento dos achados em categorias temáticas construídas a partir da leitura integral dos textos: caracterização dos estudos, modelos e desempenho, validação e fontes de incerteza, e implicações para a gestão.

Por se tratar de pesquisa desenvolvida com base em material já publicado e de domínio público, sem coleta de dados com seres humanos ou animais, o estudo dispensa apreciação por Comitê de Ética em Pesquisa, nos termos da legislação brasileira aplicável.

Figura 1. Fluxograma do processo de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão dos estudos, conforme a recomendação PRISMA 2020.



Fonte: Elaborada pelos autores (2026), com base em Page *et al.* (2021).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A amostra final reuniu 18 estudos publicados entre 2021 e 2026, distribuídos em 10 periódicos distintos. A Tabela 1 apresenta a caracterização dos estudos selecionados quanto à autoria, ao ano de publicação, ao país ou região investigada e aos principais desfechos relatados.

Tabela 1. Caracterização dos estudos incluídos na revisão integrativa quanto à autoria, ao ano, ao país e aos principais desfechos (n = 18).

Autor	Ano	País	Principais desfechos
Abbasi <i>et al.</i>	2021	Irã	Evapotranspiração estimada por índices de vegetação em imagens Landsat a 30 metros na bacia do rio Zayandehrud; redução da área colhida com perda correspondente de consumo hídrico a jusante; necessidade de correção de continuidade entre sensores.
Jiang; Liu	2021	China	Avaliação de oito produtos globais contra balanço hídrico em bacias de montanha; melhor desempenho de algoritmo simplificado de balanço de

Autor	Ano	País	Principais desfechos
			energia, com eficiência de Nash e Sutcliffe de 0,80 e de Kling e Gupta de 0,90; desempenho superior em áreas semiáridas.
Chen <i>et al.</i>	2023	China	Algoritmo de balanço de energia aplicado à bacia do rio Shiyang; coeficiente de determinação de 0,85 frente a Penman e Monteith; superestimação em relação ao produto orbital de referência; índice de vegetação como principal controlador da variação espacial.
Michailovsky <i>et al.</i>	2023	Global	Fechamento do balanço hídrico com produtos orbitais em 931 bacias; eficiência mediana de Nash e Sutcliffe de -0,02; nenhuma combinação de produtos globalmente superior; melhor desempenho em bacias tropicais e pior em bacias áridas.
Oliveira <i>et al.</i>	2023	Brasil	Modelos de água e carbono avaliados na Caatinga paraibana; saldo de radiação com coeficiente de determinação de 0,93; algoritmo de balanço de energia com maior desvio que o produto orbital, porém melhor representação das diferenças espaciais.
Pareeth; Karimi	2023	Irã	Mapas mensais de evapotranspiração a 30 metros para a bacia do lago Urmia com modelo de código aberto e preenchimento de falhas; coeficiente de determinação de 0,93 em áreas agrícolas; ganho restrito a culturas de verão e pomares.
Castagna <i>et al.</i>	2024	Brasil	Análise cienciométrica de 140 artigos publicados entre 2001 e 2022; mais de 60 por cento concentrados entre 2019 e 2022; produção concentrada no Sudeste e no Norte; MOD16 como produto mais utilizado na Amazônia.
Derardja <i>et al.</i>	2024	Global	Revisão de modelos baseados em temperatura da superfície; nenhum modelo adequado a todas as condições; subestimação do fluxo de calor sensível em dosséis altos e em regiões semiáridas; incerteza atribuída a entradas, calibração e heterogeneidade do pixel.
Du <i>et al.</i>	2024	Estados Unidos e Europa	Quatro algoritmos de aprendizado de máquina testados em quinze sítios de covariância de vórtices turbulentos; erro quadrático médio de 0,259 a 0,373 milímetro por dia e coeficiente de determinação de 0,819 a 0,949; melhor algoritmo variou por zona climática.
Kragh <i>et al.</i>	2024	Espanha	Comparação de abordagens para quantificar irrigação na bacia do baixo Ebro; abordagem conjunta de umidade do solo e evapotranspiração desviou 37 milímetros da referência, contra -208 milímetros da abordagem baseada apenas em evapotranspiração.
Volk <i>et al.</i>	2024	Estados Unidos	Conjunto de modelos abertos avaliado contra 152 estações; erro absoluto médio de 15,8 milímetros por mês em áreas agrícolas, cerca de 17 por cento do observado, com coeficiente de determinação de 0,90; superestimação em sítios florestados.
Zhao <i>et al.</i>	2024	China	Algoritmo de balanço de energia em plataforma de nuvem aplicado a áreas irrigadas de Xinjiang entre 2005 e 2021; correlações superiores a 0,7; evapotranspiração sazonal média de 704 e 677 milímetros; índice de estresse hídrico decrescente.
Behura <i>et al.</i>	2025	Ásia	Revisão de métodos de estimativa da evapotranspiração em arrozais; limitações de nebulosidade, calibração e distinção entre lâmina de água e vegetação; abordagens híbridas apontadas como as mais promissoras.
Moyano <i>et al.</i>	2025	Espanha	Modelo de duas fontes adaptado com inércia térmica aplicado a Doñana; superação da formulação original em áreas irrigadas semiáridas; evapotranspiração crescente na agricultura e decrescente nas zonas úmidas, com coeficiente inferior a -0,5.
Nery <i>et al.</i>	2025	Brasil	Rede neural alimentada por bandas espectrais do Landsat 8 comparada a algoritmo de balanço de energia em unidade de conservação paulista;

Autor	Ano	País	Principais desfechos
			acurácias de 68,18 e 77,42 por cento; previsões ainda de baixa precisão, com indícios de sobreajuste.
Zhu <i>et al.</i>	2025	China	Fusão de dados orbitais e meteorológicos com rede neural convolucional para espacializar medições de torres de fluxo a 30 metros; correlação de 0,90 e erro quadrático médio de 0,66 milímetro por dia em área homogênea; temperatura da superfície como principal preditor.
Behura <i>et al.</i>	2026	Índia	Algoritmo de balanço de energia aplicado a arrozais de Odisha com imagens Landsat 8; erro quadrático médio de 0,965 milímetro por dia, erro absoluto médio de 0,27 e coeficiente de determinação de 0,79; maiores valores no estádio de meia estação.
Ratshiedana <i>et al.</i>	2026	África do Sul	Quatro algoritmos avaliados contra lisímetro de pesagem no esquema de Vaalharts; método por índices de vegetação com coeficiente de determinação de 0,85 e erro quadrático médio de 0,58 milímetro por dia; balanço de energia de fonte única em segundo lugar; índice de estresse hídrico com desempenho fraco.

Fonte: Elaborada pelos autores (2026).

4.1 Caracterização dos estudos incluídos

A distribuição geográfica dos estudos revelou concentração em poucos polos de produção. A China respondeu por quatro publicações, o Brasil por três, a Espanha e o Irã por duas cada, e a Índia, a África do Sul e os Estados Unidos por uma cada. Três trabalhos adotaram escopo global ou multinacional. Essa configuração reproduz, no campo da evapotranspiração, o mesmo desequilíbrio observado em outras áreas da hidrologia orbital, com produção concentrada em países que dispõem de redes densas de torres de fluxo e de lisímetros, condição necessária para validar os modelos.

Quanto ao delineamento, catorze estudos foram classificados como empíricos, com aplicação e validação de modelos em áreas definidas, três como revisões de literatura e um como análise cienciométrica da produção científica. A presença simultânea de revisões temáticas e de estudo cienciométrico indica um campo maduro o suficiente para sustentar reflexão sobre a própria trajetória, condição que não se verificava na década anterior (Castagna *et al.*, 2024; Derardja *et al.*, 2024).

Os biomas e os usos do solo investigados concentraram-se em ambientes agrícolas irrigados e em regiões áridas e semiáridas, presentes em onze dos dezoito estudos. Formações naturais apareceram em menor número, com destaque para a Caatinga brasileira, as zonas úmidas do sul da Espanha e as bacias montanhosas do sudoeste chinês. Essa assimetria tem implicação direta sobre a transferibilidade dos resultados, pois os algoritmos foram majoritariamente ajustados em superfícies com cobertura vegetal relativamente homogênea e com forte contraste térmico entre áreas úmidas e secas, condição que facilita a identificação dos extremos exigidos por vários modelos.

4.2 Modelos empregados e desempenho relatado

Os modelos identificados organizaram-se em quatro grupos. O primeiro, presente em oito estudos, reúne os algoritmos de balanço de energia de fonte única, que permanecem como a abordagem mais difundida. Os desempenhos relatados foram consistentes em escala diária, com erro quadrático médio de 0,83 milímetro por dia e coeficiente de determinação de 0,84 em esquema irrigado sul-africano (Ratshiedana *et al.*, 2026) e com coeficiente de determinação de 0,85 frente ao método de Penman e Monteith em bacia árida chinesa (Chen *et al.*, 2023).

O segundo grupo, presente em três estudos, reúne os modelos que separam a evaporação do solo da transpiração do dossel. A adaptação de um desses modelos, com substituição da umidade relativa pela inércia térmica na estimativa da evaporação do solo, superou a formulação original em áreas irrigadas semiáridas, demonstrando que ajustes dirigidos a condições específicas podem render ganhos superiores à simples troca de algoritmo (Moyano *et al.*, 2025). Revisões do campo observam, contudo, que esses modelos tendem a subestimar o fluxo de calor sensível e a superestimar o fluxo de calor latente em regiões semiáridas (Derardja *et al.*, 2024).

O terceiro grupo, presente em três estudos, apoia-se em relações empíricas entre índices de vegetação e evapotranspiração. O achado mais relevante desse conjunto é que a simplicidade não implicou perda de acurácia: em comparação direta com algoritmos físicos, a abordagem por índices de vegetação obteve o melhor desempenho entre quatro métodos avaliados, com erro quadrático médio de 0,58 milímetro por dia (Ratshiedana *et al.*, 2026). Em bacia fechada iraniana, a mesma lógica permitiu gerar estimativas a 30 metros de resolução e associá-las à dinâmica da área efetivamente colhida, revelando redução da superfície cultivada e perda correspondente de consumo hídrico a jusante (Abbasi *et al.*, 2021).

O quarto grupo, presente em quatro estudos, emprega algoritmos de aprendizado de máquina. Os desempenhos foram os mais elevados da amostra em termos absolutos, com erro quadrático médio entre 0,259 e 0,373 milímetro por dia e coeficiente de determinação entre 0,819 e 0,949 na avaliação de quatro algoritmos em quinze sítios de covariância de vórtices turbulentos (Du *et al.*, 2024). Esses valores, contudo, exigem leitura cuidadosa, pois foram obtidos em pontos instrumentados e não em superfícies contínuas de bacia, o que restringe a comparação direta com os demais grupos.

A síntese das métricas revelou um padrão de escala. Em escala diária e em sítios instrumentados, os erros quadráticos médios concentraram-se entre 0,26 e 0,97 milímetro por dia. Em escala mensal e em avaliações regionais, o erro absoluto médio situou-se próximo a 17 por cento do valor observado, com redução para cerca de 11 por cento quando a agregação passou ao ano hidrológico (Volk *et al.*, 2024). O ganho obtido pela agregação temporal é um resultado transversal relevante, pois indica que os erros

instantâneos tendem a se compensar e que a escolha do passo de tempo deve acompanhar a pergunta de gestão a ser respondida.

4.3 Validação, escalas e fontes de incerteza

A validação constitui o elo mais frágil da cadeia metodológica. Os estudos recorreram a quatro estratégias principais: comparação com torres de covariância de vórtices turbulentos, confronto com lisímetros de pesagem, verificação contra estimativas de balanço hídrico em escala de bacia e comparação cruzada com produtos orbitais consolidados. Cada estratégia carrega uma limitação própria, e a quarta delas, embora frequente, não configura validação independente, pois compara estimativas entre si.

A incompatibilidade de escalas entre o ponto medido e o pixel estimado emergiu como fonte sistemática de incerteza. Revisões do campo identificam a heterogeneidade do pixel, ao lado das variáveis de entrada e da calibração de parâmetros, como principal origem dos desvios (Derardja *et al.*, 2024). Estratégias de fusão de dados e de modelagem da área de contribuição do sensor surgiram justamente para enfrentar esse descompasso, com resultados que variaram conforme a homogeneidade da superfície: correlação de 0,90 em área agrícola uniforme e de 0,93 em mosaico urbano e agrícola, neste caso com modelo alimentado apenas por variáveis orbitais (Zhu *et al.*, 2025).

A cobertura de nuvens repetiu-se como restrição crítica, sobretudo em regiões de monção e em períodos chuvosos, quando a evapotranspiração atinge os maiores valores. A literatura de síntese registra que essa limitação, somada à dificuldade de distinguir lâmina de água de vegetação em cultivos inundados, compromete a continuidade das séries e motiva o desenvolvimento de técnicas de preenchimento de falhas (Behura *et al.*, 2025). A aplicação dessas técnicas em bacia iraniana mostrou ganho seletivo, pois melhorou as estimativas em culturas de verão irrigadas e em pomares, mas não em cultivos de inverno nem em áreas de sequeiro (Pareeth; Karimi, 2023).

A dependência de calibração local foi outra constante. Modelos de aprendizado de máquina tiveram desempenho condicionado à zona climática e ao conjunto de preditores, de modo que o algoritmo mais adequado variou entre regiões, o que inviabiliza a transposição automática de uma configuração treinada para outro contexto (Du *et al.*, 2024). Resultado análogo apareceu em aplicações brasileiras, nas quais redes neurais alimentadas por dados espectrais ainda não reproduziram satisfatoriamente as estimativas do algoritmo físico de referência (Nery *et al.*, 2025).

Por fim, a propagação de incerteza para o balanço hídrico foi quantificada de forma explícita em dois estudos. O primeiro demonstrou que, em escala global, o fechamento do balanço com produtos orbitais raramente supera o patamar de desempenho aceitável e que a superioridade de um produto não se sustenta

entre regiões (Michailovsky *et al.*, 2023). O segundo mostrou que a estimativa da irrigação a partir exclusivamente da evapotranspiração subestimou o volume de referência em 208 milímetros, enquanto a abordagem que combinou evapotranspiração e umidade do solo reduziu o desvio para 37 milímetros, evidência direta do ganho proporcionado pela restrição conjunta de duas variáveis observadas (Kragh *et al.*, 2024).

4.4 Implicações para a gestão de bacias hidrográficas

Três implicações práticas emergem da síntese. A primeira é que a escolha do modelo deve ser orientada pelo contexto, e não por uma hierarquia fixa de desempenho. A evidência mais contundente nesse sentido é a de que abordagens simples, baseadas em índices de vegetação, superaram algoritmos fisicamente mais completos em condições agrícolas irrigadas (Ratshiedana *et al.*, 2026), ao passo que algoritmos de balanço de energia mostraram vantagem na representação da variabilidade espacial em vegetação nativa heterogênea (Oliveira *et al.*, 2023).

A segunda implicação diz respeito ao passo de tempo da informação. Dado que a agregação temporal reduz o erro relativo, decisões de alocação anual e de planejamento de safra podem apoiar-se com segurança em estimativas orbitais, enquanto a operação diária de sistemas de irrigação exige cautela adicional e, preferencialmente, ancoragem em medições locais (Volk *et al.*, 2024). Essa distinção oferece critério objetivo para definir até onde o produto orbital substitui a medição de campo e a partir de onde apenas a complementa.

A terceira implicação é institucional. A disponibilidade de produtos abertos e de plataformas de processamento em nuvem reduziu drasticamente o custo de entrada, permitindo que comitês de bacia e órgãos gestores produzam séries próprias sem infraestrutura computacional dedicada (Zhao *et al.*, 2024; Pareeth; Karimi, 2023). Para o contexto brasileiro, a articulação entre esses recursos e os estudos já consolidados em biomas específicos representa oportunidade de qualificação da informação hidrológica com investimento marginal reduzido (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2025; Castagna *et al.*, 2024).

Cumpramos reconhecer as limitações desta revisão. A restrição a cinco bases e a três idiomas pode ter excluído publicações veiculadas em repositórios institucionais ou em periódicos de circulação regional. A exclusão de teses, dissertações e trabalhos de eventos, adotada para preservar a homogeneidade do corpus revisado por pares, reduziu o acesso a experiências aplicadas de gestão. A heterogeneidade das métricas, das escalas temporais e das estratégias de validação impediu qualquer síntese quantitativa, de modo que as comparações apresentadas devem ser lidas como aproximações de ordem de grandeza. Por fim, a

concentração dos estudos em ambientes agrícolas irrigados limita a generalização dos achados para bacias dominadas por vegetação nativa.

5. CONCLUSÃO

Esta revisão integrativa analisou 18 estudos publicados entre 2021 e 2026 sobre a quantificação da evapotranspiração real por sensoriamento remoto em bacias hidrográficas. Os achados indicam que o campo se organiza em quatro grupos de abordagens, os algoritmos de balanço de energia de fonte única, os modelos de duas fontes, os métodos apoiados em índices de vegetação e os algoritmos de aprendizado de máquina, sem que nenhum deles se mostre universalmente superior aos demais.

Os desempenhos relatados situaram-se, em escala diária e em sítios instrumentados, entre 0,26 e 0,97 milímetro por dia de erro quadrático médio, com coeficientes de determinação entre 0,79 e 0,95. Em escala mensal e regional, o erro absoluto médio aproximou-se de 17 por cento do valor observado, reduzindo-se com a agregação temporal. Esse comportamento sustenta a recomendação de ajustar o passo de tempo da estimativa à natureza da decisão de gestão a ser tomada.

As limitações recorrentes foram a cobertura de nuvens em períodos chuvosos, a necessidade de calibração local, a incompatibilidade entre a escala do pixel e a da medição de referência e a escassez de observações de campo para validação independente. A propagação dessas incertezas para o fechamento do balanço hídrico foi documentada de forma explícita e constitui o principal obstáculo ao uso autônomo dos produtos orbitais em decisões de alocação.

Como contribuição, o estudo organiza em um mesmo quadro os modelos utilizados, as magnitudes de erro efetivamente alcançadas e as condições sob as quais cada abordagem apresenta vantagem comparativa. Para a agenda futura, recomenda-se a ampliação das redes de medição em biomas tropicais e semiáridos, o desenvolvimento de estratégias de validação que enfrentem a incompatibilidade de escalas, a exploração sistemática da restrição conjunta de evapotranspiração e umidade do solo no fechamento do balanço hídrico e a avaliação de algoritmos em bacias dominadas por vegetação nativa, ainda sub-representadas na literatura.

REFERÊNCIAS

ABBASI, N. *et al.* Estimating actual evapotranspiration over croplands using vegetation index methods and dynamic harvested area. *Remote Sensing*, v. 13, n. 24, art. 5167, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs13245167>. Acesso em: 16 ago. 2026.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (Brasil). *Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2025*. Brasília, DF: ANA, 2025. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/portal/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos>. Acesso em: 12 ago. 2026.

ALMEIDA, C. B. de; ALVES, M. S.; FLORES, F. F.; MUSSI, R. F. de F. Revisão integrativa: da realização da pesquisa ao desenho da publicação acadêmica. *Cenas Educacionais*, v. 7, e20891, 2024. Disponível em: <https://revistas.uneb.br/cenaseducacionais/article/view/20891>. Acesso em: 14 ago. 2026.

BEHURA, K. B. *et al.* Comprehensive analysis of methods for estimating actual paddy evapotranspiration: a review. *Frontiers in Water*, v. 7, art. 1553732, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/frwa.2025.1553732>. Acesso em: 28 ago. 2026.

BEHURA, K. B. *et al.* Evaluation of actual evapotranspiration from rice fields of Odisha using remote sensing based surface energy balance approach. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, v. 54, n. 3, p. 1031-1045, 2026. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12524-025-02345-2>. Acesso em: 29 ago. 2026.

CASTAGNA, D. *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, art. 39, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/hydrology11030039>. Acesso em: 21 ago. 2026.

CHEN, X. *et al.* Estimating the actual evapotranspiration using remote sensing and SEBAL model in an arid environment of northwest China. *Water*, v. 15, n. 8, art. 1555, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w15081555>. Acesso em: 17 ago. 2026.

DERARDJA, B. *et al.* Advancements in remote sensing for evapotranspiration estimation: a comprehensive review of temperature-based models. *Remote Sensing*, v. 16, n. 11, art. 1927, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs16111927>. Acesso em: 22 ago. 2026.

DU, C. *et al.* Machine learning-based estimation of daily cropland evapotranspiration in diverse climate zones. *Remote Sensing*, v. 16, n. 5, art. 730, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs16050730>. Acesso em: 23 ago. 2026.

JIANG, Y.; LIU, Z. Evaluations of remote sensing-based global evapotranspiration datasets at catchment scale in mountain regions. *Remote Sensing*, v. 13, n. 24, art. 5096, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs13245096>. Acesso em: 15 ago. 2026.

KRAGH, S. J. *et al.* An inter-comparison of approaches and frameworks to quantify irrigation from satellite data. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 28, n. 3, p. 441-457, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/hess-28-441-2024>. Acesso em: 24 ago. 2026.

MICHAILOVSKY, C. I. *et al.* Investigating sources of variability in closing the terrestrial water balance with remote sensing. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 27, n. 23, p. 4335-4354, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/hess-27-4335-2023>. Acesso em: 18 ago. 2026.

MOYANO, M. C. *et al.* Remote sensing-based assessment of evapotranspiration patterns in a UNESCO World Heritage site under increasing water competition. *Remote Sensing*, v. 17, n. 14, art. 2339, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs17142339>. Acesso em: 26 ago. 2026.

NERY, L. M. *et al.* Estimativa da evapotranspiração com redes neurais artificiais e dados espectrais: aplicação em uma unidade de conservação. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 40, e40250003, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0102-778640250003>. Acesso em: 27 ago. 2026.

OLIVEIRA, M. L. de *et al.* Evaluation of water and carbon estimation models in the Caatinga biome based on remote sensing. *Forests*, v. 14, n. 4, art. 828, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/f14040828>. Acesso em: 19 ago. 2026.

PAGE, M. J. *et al.* The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, v. 372, art. n71, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>. Acesso em: 13 ago. 2026.

PAREETH, S.; KARIMI, P. Evapotranspiration estimation using surface energy balance model and medium resolution satellite data: an operational approach for continuous monitoring. *Scientific Reports*, v. 13, art. 12026, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-38563-2>. Acesso em: 20 ago. 2026.

RATSHIEDANA, P. E. *et al.* Evaluation of four remote sensing algorithms in estimating actual evapotranspiration in agricultural environments. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 30, n. 13, p. 4383-4404, 2026. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/hess-30-4383-2026>. Acesso em: 1 set. 2026.

UNESCO. *The United Nations World Water Development Report 2024: water for prosperity and peace*. Paris: Unesco, 2024. Disponível em: <https://www.unwater.org/publications/un-world-water-development-report-2024>. Acesso em: 14 ago. 2026.

VOLK, J. M. *et al.* Assessing the accuracy of OpenET satellite-based evapotranspiration data to support water resource and land management applications. *Nature Water*, v. 2, n. 2, p. 193-205, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s44221-023-00181-7>. Acesso em: 25 ago. 2026.

ZHAO, S. *et al.* Estimation of actual evapotranspiration and water stress in typical irrigation areas in Xinjiang, northwest China. *Remote Sensing*, v. 16, n. 14, art. 2676, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs16142676>. Acesso em: 30 ago. 2026.

ZHU, P. *et al.* A novel framework based on data fusion and machine learning for upscaling evapotranspiration from flux towers to the regional scale. *Remote Sensing*, v. 17, n. 23, art. 3813, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs17233813>. Acesso em: 2 set. 2026.