



C A P Í T U L O 3

COMPARAÇÃO ENTRE DADOS DE CAMPO E DE SATÉLITE PARA ESTIMATIVA DA DEMANDA HÍDRICA DAS CULTURAS

Lucas Santiago Lima

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas/PPGESA,
Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/ESALQ, Universidade de São
Paulo/USP Avenida Pádua Dias, 11, 13418-900, Piracicaba/SP, Brasil

Vinícius Villa e Vila

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas/PPGESA,
Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/ESALQ, Universidade de São
Paulo/USP Avenida Pádua Dias, 11, 13418-900, Piracicaba/SP, Brasil

Tiago Alexandre Rozinholli

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas/PPGESA,
Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/ESALQ, Universidade de São
Paulo/USP Avenida Pádua Dias, 11, 13418-900, Piracicaba/SP, Brasil

Patrícia Angélica Alves Marques

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas/PPGESA,
Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/ESALQ, Universidade de São
Paulo/USP Avenida Pádua Dias, 11, 13418-900, Piracicaba/SP, Brasil

RESUMO: A estimativa da demanda hídrica das culturas é um componente essencial para a eficiência do manejo da irrigação, principalmente em contextos de escassez hídrica e necessidade de otimização do uso da água. Tradicionalmente, essa estimativa é realizada a partir de medições em campo, como dados meteorológicos, sensores de umidade do solo e lisímetros, que fornecem alta precisão pontual, porém limitada em escala espacial. Nas últimas décadas, o sensoriamento remoto ganhou protagonismo como fonte de informação para estimar evapotranspiração e consumo hídrico das culturas, permitindo análises em escalas maiores, maior frequência temporal e menor custo operacional. Apesar desses avanços, ainda existe uma lacuna relacionada à comparação objetiva entre esses dois tipos de dados, como de campo e satélite, especialmente no contexto da tomada de decisão para irrigação. Portanto, é necessário entender as vantagens, limitações e complementaridades de ambas as

abordagens, os principais métodos de estimativa da demanda hídrica utilizados atualmente, e como sua integração pode aprimorar a eficiência da irrigação em diferentes sistemas agrícolas.

PALAVRAS-CHAVE: dados meteorológicos; evapotranspiração; sensoriamento remoto.

ABSTRACT: The estimation of crop water demand is an essential component for efficient irrigation management, particularly in contexts of water scarcity and the need to optimize water use. Traditionally, this estimation is based on field measurements such as meteorological data, soil moisture sensors, and lysimeters, which provide high point-level accuracy but are limited in spatial scale. In recent decades, remote sensing has gained prominence as a source of information for estimating evapotranspiration and crop water consumption, enabling analyses at larger scales, with higher temporal frequency and lower operational cost. Despite these advances, there is still a gap related to the objective comparison between these two types of data, field-based and satellite-based, especially in the context of irrigation decision-making. Therefore, it is necessary to understand the advantages, limitations, and complementarities of both approaches, the main methods currently used to estimate crop water demand, and how their integration can enhance irrigation efficiency in different agricultural systems.

KEYWORDS: meteorological data; evapotranspiration; remote sensing.

INTRODUÇÃO

O manejo eficiente da irrigação é um dos maiores desafios da agricultura, sobretudo diante do aumento da demanda por alimentos, das mudanças climáticas e da crescente pressão sobre os recursos hídricos. Em muitos sistemas agrícolas, o consumo de água destinado à irrigação supera 70% do uso total (Howell, 2001), e estimativas imprecisas da demanda hídrica podem resultar em desperdício, menor produtividade e impactos ambientais significativos. Por isso, compreender quanto e quando aplicar água no sistema produtivo é uma necessidade para alcançar eficiência, sustentabilidade e segurança hídrica.

A demanda hídrica das culturas está diretamente relacionada aos processos de evapotranspiração, que representam a soma da transpiração das plantas e da evaporação da superfície do solo. Estimativas desses processos permitem o correto dimensionamento dos sistemas em função das lâminas de irrigação, e ajustem estratégias de manejo em diferentes etapas fenológicas. Estimar a evapotranspiração envolve variáveis meteorológicas, características da cultura, condições do solo e interações dinâmicas entre planta e atmosfera. Nesse contexto, surgem duas grandes abordagens de obtenção dos dados: métodos baseados em campo e métodos baseados em sensoriamento remoto.

Os métodos tradicionais, baseados em medições em campo, incluem o uso de estações meteorológicas, lisímetros, sensores de umidade do solo e cálculos derivados da equação de Penman-Monteith (Allen et al. 1998). Esses métodos possuem precisão e detalhamento temporal, permitindo ajustes no manejo da irrigação. Contudo, apresentam limitações importantes, como representatividade espacial reduzida, custo de instalação e manutenção, e dependência de infraestrutura e calibração contínua. Em propriedades agrícolas heterogêneas, ou em regiões onde o acesso a equipamentos é limitado, a aplicação exclusiva desses métodos pode resultar em estimativas pouco representativas para toda a área irrigada.

Por outro lado, o advento do sensoriamento remoto oferece uma visão espacial ampla e contínua do território agrícola. Imagens de satélites como Landsat, Sentinel-2 e MODIS permitem estimar variáveis biofísicas essenciais, como índice de vegetação (NDVI), albedo, temperatura de superfície e radiação disponível. Combinando essas informações a modelos específicos, como SEBAL, METRIC e SAFER, é possível derivar estimativas de evapotranspiração real com boa acurácia. A principal vantagem dos dados de satélite está na capacidade de capturar variações espaciais da cultura e do ambiente, permitindo ao produtor identificar zonas de manejo, áreas com déficit hídrico e padrões de consumo ao longo do tempo.

Apesar do grande avanço tecnológico, ainda existem desafios relacionados à resolução espacial e temporal das imagens, cobertura de nuvens, necessidade de calibração com dados locais, além da dependência de modelos matemáticos complexos. Essas questões fazem com que a comparação direta entre dados de campo e dados de satélite seja não apenas relevante, mas necessária. Isso porque, na prática, a tomada de decisão em irrigação não pode depender exclusivamente de um tipo de informação: ambos apresentam forças e limitações, e sua combinação pode resultar em estimativas mais precisas, robustas e operacionalmente eficientes.

FUNDAMENTOS DA DEMANDA HÍDRICA E EVAPOTRANSPIRAÇÃO

A demanda hídrica de uma cultura é determinada principalmente pelos processos de evapotranspiração, que representam o consumo real de água pela planta e sua transferência para a atmosfera. A evapotranspiração integra dois mecanismos complementares: evaporação, correspondente à perda de água do solo e de superfícies úmidas; e transpiração, associada ao metabolismo vegetal e ao funcionamento estomático. Compreender esses processos é essencial para o planejamento do manejo da irrigação, uma vez que a lâmina aplicada deve repor a água consumida para evitar estresse hídrico e garantir o desempenho produtivo.

Um dos parâmetros-chave nesse contexto é o coeficiente de cultura (K_c), que incorpora características fisiológicas, morfológicas e de cobertura da planta, permitindo ajustar a Evapotranspiração de Referência (ET_o) ao comportamento real do cultivo. Assim, culturas com maior índice de área foliar, maior atividade estomática ou maior metabolismo tendem a apresentar K_c mais elevados.

O método padrão recomendado pela *Food and Agriculture Organization* (FAO) para estimar a ET_o é o modelo FAO-56 Penman–Monteith, amplamente utilizado tanto em medições de campo quanto em sistemas automatizados de irrigação e modelos de satélite. A equação integra parâmetros meteorológicos fundamentais, como: radiação solar líquida, velocidade do vento, temperatura do ar, pressão de vapor e umidade relativa, combinado termos aerodinâmicos e energéticos que expressam o balanço de energia entre a superfície vegetada e a atmosfera. Apesar de sua reconhecida precisão, sua aplicação prática depende de medições meteorológicas confiáveis, que nem sempre estão disponíveis em regiões agrícolas de pequeno ou médio porte.

Os fatores que influenciam a demanda hídrica como a evapotranspiração são ambientais, agronômicos e fisiológicos. Atmosfera: temperatura do ar, déficit de pressão de vapor, radiação solar e vento têm influência direta sobre os fluxos de calor e perda de água; Solo: umidade disponível, textura, estrutura e cobertura do solo interferem tanto na evaporação quanto na capacidade da planta em extrair água; Planta: área foliar, arquitetura, estágio fenológico e saúde fisiológica são determinantes para a transpiração; Manejo agrícola: práticas como fertirrigação, densidade de plantio, cobertura morta e controle de plantas daninhas alteram o microclima e o balanço hídrico.

A interação desses fatores torna a estimativa da demanda hídrica um processo complexo, exigindo métodos confiáveis e adaptáveis às condições reais de campo. Nesse sentido, tanto os métodos tradicionais de campo quanto os métodos derivados de imagens de satélite buscam capturar essa variabilidade, cada um com suas respectivas vantagens operacionais.

MÉTODOS BASEADOS EM DADOS DE CAMPO

Os métodos de estimativa da demanda hídrica baseados em dados de campo representam a abordagem mais tradicional e, em muitos casos, a mais precisa para o manejo da irrigação. Eles se apoiam em medições diretas ou indiretas de variáveis meteorológicas, hídricas e fisiológicas, fornecendo informações detalhadas e com alta resolução temporal. No entanto, apesar da confiabilidade, esses métodos geralmente são limitados em representatividade espacial, exigindo equipamentos específicos, manutenção constante e conhecimento técnico especializado.

As estações meteorológicas automáticas são a principal fonte de dados para o cálculo da ET_o. Elas fornecem medições contínuas de temperatura do ar, umidade relativa, radiação solar, velocidade do vento e pressão atmosférica, variáveis fundamentais para aplicação da equação de Penman–Monteith. Sua principal vantagem é a precisão temporal, com dados gerados em intervalos que variam de minutos a horas. Ainda assim, a capacidade dessas estações de representar áreas extensas é limitada. Um único ponto de medição não captura variações microclimáticas presentes em áreas agrícolas heterogêneas, como diferenças de altitude, tipo de solo, sombreamento ou padrões de vento. Assim, extrapolar seus dados para grandes propriedades pode introduzir incertezas consideráveis.

Os lisímetros são considerados o método padrão para medir evapotranspiração da cultura (ET_c). Trata-se de equipamentos que isolam um volume de solo e plantas, monitorando diretamente a perda de água por meio de pesagem ou balanço hídrico. Existem dois tipos principais: lisímetros de pesagem, que medem diretamente as variações de massa associadas à evapotranspiração; lisímetros de drenagem, que estimam ET_c a partir da água infiltrada e da água armazenada no solo (Howell et al. 2015). A precisão desses equipamentos permite calibrações refinadas de K_c, tornando-os essenciais para pesquisas agrônômicas. Entretanto, seu custo elevado, a complexidade de instalação e a baixa representatividade espacial limitam sua aplicação em propriedades comerciais.

Outra alternativa utilizada para manejo de irrigação é o uso de sensores de umidade do solo, como tensiômetros, TDR (*Time Domain Reflectometry*), FDR (*Frequency Domain Reflectometry*) e sensores capacitivos. Esses dispositivos permitem monitorar a água disponível na zona radicular, indicando o momento ideal para irrigação e evitando tanto o estresse hídrico quanto o excesso de água. Tais sensores de solo são especialmente úteis em sistemas de irrigação por gotejamento, onde a distribuição de água é localizada. Entretanto, sua representatividade espacial também é limitada, exigindo instalação em múltiplos pontos para capturar a variabilidade de propriedades físicas e conteúdo de água no solo.

Além dos métodos anteriores, alguns sistemas avançados utilizam fluxos turbulentos e balanço de energia para medir diretamente o fluxo de calor latente (LE), relacionado à evapotranspiração. Torres de fluxo (eddy covariance) e sistemas Bowen ratio são exemplos que fornecem estimativas contínuas e detalhadas da troca de vapor d'água entre superfície e atmosfera. Esses métodos são robustos para pesquisas e calibrações, mas possuem custo elevado, dependem de manutenção frequente e não são viáveis para aplicações rotineiras em propriedades comerciais.

A Tabela 1 apresenta uma comparação entre as vantagens e limitações dos métodos de campo para a obtenção da Evapotranspiração.

Tabela 1 - Vantagens e limitações dos métodos de campo.

Vantagens	Desvantagens
Alta precisão e confiabilidade	Baixa representatividade espacial
Excelente resolução temporal	Alto custo de instalação e manutenção
Adequados para calibração de modelos e validação de dados de satélite	Sensibilidade a falhas e necessidade de calibração
Fundamento físico bem compreendido	Dificuldade de aplicação em áreas extensas ou de acesso remoto

MÉTODOS BASEADOS EM DADOS DE SATÉLITE

O uso de sensoriamento remoto para estimar a demanda hídrica das culturas trás a possibilidade de obter informações espaciais e temporais sobre vegetação, solo e atmosfera permite estimar a evapotranspiração em escalas que antes eram impossíveis com métodos tradicionais. Nesse contexto, satélites como Landsat, Sentinel-2, MODIS e VIIRS oferecem variáveis biofísicas essenciais que, quando combinadas a modelos físicos e empíricos, tornam-se ferramentas poderosas para gestão da água na agricultura irrigada.

O sensoriamento remoto fornece informações principalmente a partir da refletância espectral e da temperatura de superfície, sendo inestimável para o monitoramento de mudanças de curto e longo prazo das atividades humanas (Schowengerdt, 2007). A evapotranspiração de uma cultura está diretamente relacionada à energia utilizada pela planta para converter água líquida em vapor, processo que deixa marcas espectrais e térmicas detectáveis por sensores orbitais.

Os principais tipos de dados utilizados incluem:

- I. Bandas ópticas (visível e infravermelho próximo): associadas ao vigor vegetativo, índice de área foliar e cobertura do dossel;
- II. Infravermelho de ondas curtas (SWIR): sensível ao conteúdo hídrico da vegetação e ao estresse hídrico;
- III. Termal (TIR): usada para estimar temperatura da superfície, relacionada diretamente à transpiração e ao balanço de energia;
- IV. Radar (SAR): menos dependente de condições atmosféricas, útil para propriedades físicas do solo e estrutura da vegetação;

Essa combinação de dados possibilita estimar componentes do balanço de energia e, consequentemente, a evapotranspiração. Diversos modelos foram desenvolvidos para estimar evapotranspiração a partir de imagens de satélite. O SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*), é um modelo baseado no balanço de energia na superfície, considera radiação líquida, fluxo de calor no solo

e fluxo de calor sensível (Gonçalves et al. 2022). A evapotranspiração é derivada como o fechamento do balanço, tendo como pontos fortes: robustez física e boa acurácia, e limitações: calibragem necessária e dependência da banda termal. O METRIC (*Mapping Evapotranspiration at High Resolution with Internalized Calibration*), variante do SEBAL com calibração interna utilizando dados de estações meteorológicas locais, tem como pontos fortes: excelente precisão para estudos agrícolas e calibração interna usando *pixels* das imagens, e limitações: necessidade de dados de campo para ajustar o modelo (Tasumi, 2019).

Na Figura 1 é apresentada de forma sintetizada o fluxo de trabalho para estimar a evapotranspiração utilizando o METRIC, o processo inicial com a entrada de dados meteorológicos e de sensoriamento remoto, que passam por um controle de qualidade antes de serem utilizados, na sequência o modelo gera estimativas preliminares da evapotranspiração, baseada no balanço de energia da superfície, assim, após esta fazer o modelo produz a evapotranspiração que é então comparada com estimativas independentes.

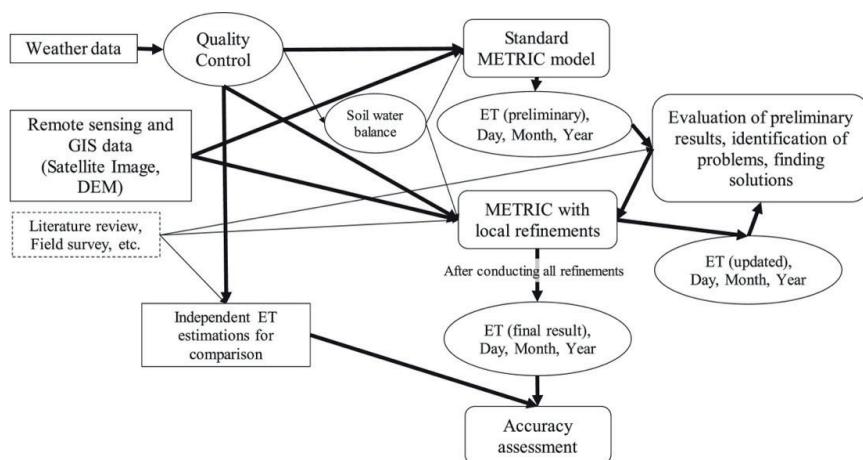


Figura 1. Fluxograma da computação da evapotranspiração pelo modelo METRIC. Fonte: Tasumi (2019).

O SAFER (*Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving*) é um modelo mais simples que usa relações empíricas entre radiação, NDVI e temperatura para calcular a ET, surgiu com uma abordagem para superar limitações dos métodos tradicionais. Pontos fortes: menor número de parâmetros; adequado para aplicações operacionais, quanto as limitações: menor precisão em condições atmosféricas complexas (Farias et al., 2024).

Produtos MODIS e VIIRS, incluem estimativas diárias ou de 8 dias de ET, com resoluções de 250 a 1.000 m. Pontos fortes: alta frequência temporal, e as limitações: resolução inadequada para talhões pequenos. Esses modelos variam em complexidade, resolução e demanda computacional, permitindo que produtores e gestores escolham a solução mais adequada à escala de manejo.

Com o avanço das ferramentas digitais, plataformas como Google Earth Engine, MapBiomias Água, OpenET, WaPOR e BDC (Brasil Data Cube) (MapBiomias 2025, Gorelick et al. 2017, Ferreira et al. 2020, Attalah et al. 2025) democratizaram o acesso a dados e modelos de evapotranspiração. Muitas dessas plataformas permitem: acesso gratuito à séries temporais de ET, análise espacial por talhão, integração com dados de clima, solo e vegetação, combinações de múltiplos satélites. Essa evolução tecnológica facilita sua adoção no campo e amplia a capacidade de análise, especialmente para médias e grandes propriedades, o seu uso para o manejo da irrigação ainda possui grandes desafios muito por conta das desvantagens que o uso de imagens de satélite possui (Tabela 2).

Tabela 2. Vantagens e limitações dos métodos de satélite.

Vantagens	Desvantagens
Alta representatividade espacial	Dependência de condições atmosféricas (nuvens)
Detecção de variabilidade intra-talhão	Necessidade de validação com dados locais
Menor custo operacional	Resoluções nem sempre compatíveis com sistemas pequenos
Acesso a dados históricos e séries longas	Atraso temporal entre aquisição e disponibilização das imagens
Cobertura de grandes áreas	Complexidade computacional em alguns modelos

COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE CAMPO E DADOS DE SATÉLITE PARA A TOMADA DE DECISÃO NA IRRIGAÇÃO

A escolha entre métodos de campo e métodos baseados em sensoriamento remoto não é trivial e depende de múltiplos fatores, como escala de análise, disponibilidade de equipamentos, custo, precisão desejada e tipo de sistema irrigado. Para que a tomada de decisão seja eficiente e sustentável, é necessário compreender como cada abordagem se comporta em diferentes cenários agrícolas.

Os métodos de campo, especialmente lisímetros e sensores de solo, oferecem a maior precisão pontual disponível, sendo fundamentais para calibração de coeficientes de cultura (Kc) e validação de modelos. A equação de Penman–Monteith

aplicada com dados meteorológicos de qualidade também apresenta excelente confiabilidade. No entanto, essa precisão é local e em áreas com alta variabilidade espacial, solos heterogêneos ou diferenças microclimáticas, um conjunto limitado de sensores pode não representar adequadamente toda a área irrigada.

Os métodos de satélite, por outro lado, apresentam precisão moderada a alta dependendo do modelo, mas sua principal vantagem é a representatividade espacial. Mesmo que a estimativa pontual seja menos precisa que um lisímetro, o satélite captura a variabilidade real da área, permitindo identificar zonas de manejo e padrões de estresse hídrico que métodos de campo jamais detectariam sozinhos.

Sensores de campo são extremamente limitados em escala: um sensor representa uma área muito pequena, exigindo múltiplas unidades para cobrir um talhão. Essa limitação se torna crítica em propriedades médias e grandes. O sensoriamento remoto supera plenamente essa barreira, permitindo análises em: talhões individuais, fazendas, perímetros irrigados e até bacias hidrográficas. Além disso, sua capacidade de oferecer séries históricas facilita a análise de tendências, planejamento de safra e diagnóstico de ineficiências no uso da água.

Métodos de campo geralmente possuem custos iniciais elevados e manutenção contínua: calibração, troca de sensores, danos climáticos, energia e telecomunicação. Sensoriamento remoto, especialmente de plataformas públicas (Sentinel, Landsat, MODIS), possui custo zero de aquisição de dados e custo operacional reduzido. Plataformas como Google Earth Engine eliminam a necessidade de infraestrutura própria. Por outro lado, métodos de satélite de alta resolução (Planet, WorldView, SkySat) podem ser caros, representando limitações para pequenos produtores. Métodos de campo exigem expertise para instalação, calibração e interpretação das medições. São suscetíveis a falhas técnicas e variabilidade local excessiva.

Dados de satélite, apesar de inicialmente complexos, têm se tornado cada vez mais acessíveis graças a plataformas operacionais que já fornecem mapas prontos de evapotranspiração. Assim, do ponto de vista prático, o sensoriamento remoto tende a superar as limitações operacionais para sistemas maiores, enquanto sensores de campo continuam essenciais para ajustes finos e calibração. Em vez de pensar em substituição, o caminho natural e mais eficiente é a integração entre ambas as abordagens: os dados de campo corrigem, calibram e validam os modelos de satélite; os dados de satélite ampliam espacialmente a informação e revelam padrões invisíveis aos sensores locais. Essa integração permite uma abordagem híbrida, chamada irrigação inteligente, em que: a decisão “quando irrigar” é refinada por sensores de solo e dados meteorológicos e a decisão “onde irrigar mais ou menos” é fundamentada em mapas de ET e índices de vegetação. Sistemas modernos de manejo já incorporam essa lógica, combinando dados orbitais, sensores IoT e modelos climáticos, elevando a eficiência do uso da água e reduzindo custos operacionais.

APLICAÇÕES PRÁTICAS NO MANEJO DA IRRIGAÇÃO

A integração entre dados de campo e dados de satélite tem se consolidado como uma das estratégias mais eficientes para otimizar o manejo da irrigação. A seguir, são apresentadas aplicações práticas que demonstram como esses métodos podem ser utilizados de forma complementar em diferentes sistemas agrícolas. Em propriedades com estações meteorológicas e sensores de solo, a lâmina de irrigação é tradicionalmente calculada a partir da evapotranspiração de referência (ET_o) e do coeficiente de cultura (K_c). Entretanto, essa abordagem não reflete necessariamente o consumo real da cultura em toda a área.

Ao incorporar mapas de evapotranspiração real (ET_a) derivados de satélite, o produtor pode identificar áreas sub ou super irrigadas, ajustar a quantidade de água aplicada em zonas específicas, comparar o consumo hídrico de diferentes talhões e verificar se a ET_a está compatível com o desenvolvimento da cultura. Essa abordagem reduz desperdícios e aumenta a precisão do manejo, especialmente em pivôs centrais e irrigação localizada. Os índices de vegetação (como NDVI, NDRE e EVI) e a temperatura de superfície (LST) são indicadores eficientes do estado hídrico das plantas. Eles permitem detectar estresse antes mesmo de sintomas visuais ocorrerem.

Na prática, isso possibilita: I. Identificação precoce de falhas de irrigação, entupimento de gotejadores e problemas no sistema; II. Identificação de manchas de solo com menor retenção hídrica; III. Criação de zonas de manejo hídrico para irrigação variável. A agricultura de precisão utiliza amplamente esses produtos, gerando mapas que orientam intervenções específicas e reduzem custos operacionais. Em perímetros irrigados, bacias agrícolas ou regiões mais secas com múltiplos produtores, o sensoriamento remoto se torna essencial para monitorar o consumo hídrico total da região tanto para estações chuvosas quanto as secas (Lima, 2024), avaliar a eficiência da irrigação coletiva, mapear áreas com uso crítico de água e auxiliar órgãos gestores na alocação da água. Esses produtos têm sido aplicados em estudos de balanço hídrico regional e em programas governamentais para monitoramento da escassez.

Ao combinar dados de campo (pressão, vazão, uniformidade de aplicação) com mapas de ET_a, torna-se possível avaliar a eficiência real do sistema. Uma área onde a ET_a está consistentemente abaixo do esperado pode indicar baixa uniformidade de aplicação, subdimensionamento de emissores, falhas mecânicas ou hidráulicas, limitações do solo. Essa análise integrada permite intervenções mais precisas, priorizando as áreas críticas e evitando gastos desnecessários. Imagens de satélite disponibilizam séries temporais que permitem acompanhar o comportamento da evapotranspiração ao longo de anos. Isso possibilita avaliar impactos de práticas agrícolas, estimar produtividade por consumo hídrico, realizar auditorias hídricas

e definir estratégias de irrigação para safras futuras. A integração com dados de campo aumenta a precisão da análise temporal, fornecendo uma visão completa do sistema produtivo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os métodos de campo, como estações meteorológicas, lisímetros e sensores de umidade, oferecem precisão e detalhamento temporal, sendo fundamentais para calibração de coeficientes de cultura e para medições diretas de evapotranspiração. Entretanto, sua baixa representatividade espacial e necessidade de manutenção tornam sua aplicação, de certa forma limitada, sobretudo em áreas extensas e heterogêneas. Nesse sentido, o sensoriamento remoto surge como uma alternativa complementar ao permitir a observação espacial contínua da vegetação, do solo e da atmosfera. Modelos como SEBAL, METRIC e SAFER, juntamente com dados de satélites como Landsat, Sentinel e MODIS, proporcionam estimativas da evapotranspiração real e permitem identificar zonas de manejo, padrões de estresse hídrico e variações intra-talhão. Apesar de limitações relacionadas à dependência de condições atmosféricas, resolução e necessidade de calibração com dados locais, o sensoriamento remoto ampliou a capacidade de análise do manejo hídrico em grande escala.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, R. G. et al. *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements*. Rome: FAO, 1998. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 56).
- ARIAS, F. de J. et al. SAFER (simple algorithm for evapotranspiration retrieving): uma revisão bibliográfica. *CONTRIBUCIONES A LAS CIENCIAS SOCIALES*, v. 17, n. 13, p. e14072, 2024.
- FERREIRA, K. R. et al. Earth Observation Data Cubes for Brazil: Requirements, Methodology and Products. *Remote Sens.* 2020, 12, 4033.
- GONÇALVES, I. Z. et al. Remote sensing-based evapotranspiration modeling using geeSEBAL for sugarcane irrigation in Brazil. *Agricultural Water Management*. v. 274. 2022.
- GORELICK, N. et al. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18-27. 2017.
- HOWELL, T. A. *Enhancing water use efficiency in irrigated agriculture*. *Agronomy Journal*, v. 93, p. 281-289, 2001.

LIMA, G. S. A, de. *et al.* Evapotranspiration measurements in pasture, crops, and native Brazilian Cerrado based on UAV-borne multispectral sensor. *Environ Monit Assess*, 196, 1105. 2024. <https://doi.org/10.1007/s10661-024-13224-7>

MapBiomas, 2025, “MapBiomas Water Brazil General”Handbook” - Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD)- Collection 4”, <https://doi.org/10.58053/MapBiomas/HSR3BE>, MapBiomas Data, V1.

Schowengerdt, R. A. (2007). CHAPTER 1 - The Nature of Remote Sensing. In R. A. Schowengerdt (Ed.), *Remote Sensing (Third Edition)* (Third Edition, pp. 1–X). Academic Press.

TASUMI, M. Estimating evapotranspiration using METRIC model and Landsat data for better understandings of regional hydrology in the western Urmia Lake Basin. *Agricultural Water Management*. v. 226, 2019.