



C A P Í T U L O 2

PRINCIPAIS ESTRATÉGIAS DE MANEJO DA IRRIGAÇÃO

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.

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.

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.

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 adoção de práticas corretas de manejo da irrigação contribui para reduzir riscos climáticos, otimizar a reposição hídrica, evitar desperdícios e assegurar condições favoráveis ao crescimento das plantas ao longo de todo o ciclo produtivo. A determinação do momento de irrigar e da quantidade de água a aplicar depende da integração entre fatores como demanda atmosférica, características do solo, exigências da cultura e capacidade do sistema de irrigação. Ferramentas como a evapotranspiração, tensiometria, sensores de umidade, balanço hídrico e monitoramento de variáveis climáticas fornecem informações essenciais para essas decisões. Em cada categoria, existem equipamentos que variam quanto a precisão, praticidade e custo. Quando baseado em solo, o manejo da irrigação busca monitorar o conteúdo real de água, enquanto o manejo via clima busca calcular a evapotranspiração da cultura. Métodos baseados exclusivamente em

planta são os menos comuns na produção agrícola comercial, por exigir alta técnica e equipamentos custosos. O manejo adequado possibilita reduzir perdas por evaporação e percolação profunda, minimizar estresse hídrico, preservar a produtividade e promover sustentabilidade ambiental.

PALAVRAS-CHAVE: eficiência hídrica; estresse hídrico; evapotranspiração.

ABSTRACT: The adoption of proper irrigation management practices helps reduce climatic risks, optimize water replenishment, avoid waste, and ensure favorable conditions for plant growth throughout the entire production cycle. Determining when to irrigate and how much water to apply depends on the integration of factors such as atmospheric demand, soil characteristics, crop requirements, and the capacity of the irrigation system. Tools such as evapotranspiration, tensiometry, moisture sensors, water balance, and climate monitoring provide essential information for these decisions. Within each category, there are instruments that vary in precision, practicality, and cost. When based on soil, irrigation management focuses on monitoring the actual water content, whereas climate-based management seeks to calculate crop evapotranspiration. Methods based solely on plant indicators are less common in commercial agriculture due to their high technical requirements and costly equipment. Proper irrigation management reduces losses from evaporation and deep percolation, minimizes water stress, preserves productivity, and promotes environmental sustainability.

KEYWORDS: water efficiency; water stress; evapotranspiration.

INTRODUÇÃO

A agricultura irrigada ocupa um papel essencial no cenário produtivo mundial, contribuindo significativamente para o aumento da oferta de alimentos, a estabilidade dos sistemas agrícolas e a redução dos riscos associados à variabilidade climática. Entretanto, irrigar não significa apenas aplicar água: significa aplicar a quantidade certa, no momento adequado, com a frequência correta e de forma compatível com as condições ambientais, do solo e da planta. O manejo da irrigação é fundamental para elevar a produtividade das culturas cultivadas, permitindo maior intensificação da agricultura e contribuindo para a segurança alimentar global. Contudo, existe uma preocupação geral com o cenário de mudanças climáticas levando ao agravamento da escassez de água em cenários futuros. Nesse contexto, o manejo da irrigação surge como um conjunto de práticas científicas e técnicas que permitem ao produtor tomar decisões assertivas sobre quando e quanto irrigar (Bernardo et al., 2019).

No passado, a irrigação era baseada em percepções empíricas, geralmente associadas à aparência visual das plantas ou à frequência fixa de irrigação. Hoje, dispõe-se de diferentes técnicas que permitem otimizar o uso da água, sendo o

manejo da irrigação estruturado em três grandes estratégias: em solo, clima e planta (Zhao et al., 2023). A operação de manejo da irrigação baseada em solo usualmente utiliza metodologias para a mensuração da umidade do solo. Por outro lado, as técnicas de irrigação guiadas por clima frequentemente recorrem ao uso dos dados climáticos associados a fórmulas para a obtenção da evapotranspiração da cultura e do balanço hídrico climatológico. Os métodos de manejo baseados em planta, que interpreta respostas fisiológicas e biofísicas das culturas como indicadores diretos de estresse hídrico são menos comuns, pois muitas destas abordagens requerem equipamentos caros ou operações trabalhosas com elevada tecnicidade para a determinação do estresse hídrico. No entanto, algumas das metodologias baseadas em planta possuem a vantagem de avaliarem o estresse hídrico em tempo real e com precisão satisfatória (Levin e Nackley, 2021).

Cada uma dessas estratégias possui fundamentos, equipamentos, vantagens, limitações e formas específicas de implementação. Todas as estratégias evidenciam a necessidade de ferramentas que permitam reduzir desperdícios, melhorar a sustentabilidade dos sistemas irrigados e aumentar a produtividade da água, isto é, produzir mais com menos. Além de reduzir custos de produção e evitar perdas por estresse hídrico ou encharcamento, o manejo adequado evita problemas secundários como salinização, lixiviação de nutrientes, compactação do solo e redução da eficiência dos sistemas de irrigação. No entanto, apesar dos avanços tecnológicos, desafios importantes persistem. Pequenos e médios produtores ainda enfrentam limitações no acesso a equipamentos, assistência técnica e capacitação; muitos sistemas irrigados operam com baixa eficiência e utilizam calendários fixos de irrigação. Por esse motivo, torna-se indispensável a popularização dessas estratégias em diferentes escalas produtivas, garantindo que produtores de todos os níveis tenham acesso aos conhecimentos das estratégias, ferramentas para implementar um manejo de irrigação mais eficiente, econômico e sustentável adaptado a sua realidade.

MANEJO DA IRRIGAÇÃO VIA SOLO

O manejo via solo baseia-se na avaliação direta da água presente no perfil do solo, seja medindo seu conteúdo volumétrico ou sua tensão matricial. O cálculo da reposição hídrica por meio de metodologias baseadas em solo utiliza sensores para a mensuração da umidade do solo, compreendendo uma variedade de equipamentos, desde os mais simples e de baixo custo até aos mais tecnológicos e caros. No entanto, a finalidade destes equipamentos é similar, em que se busca monitorar o potencial de água no solo ou o conteúdo real de água no solo (Bwambale et al., 2022).

Entre os sensores estão os equipamentos de capacitância (FDR), reflectometria no domínio do tempo (TDR), sensores dielétricos, blocos porosos, tensiômetros e medidores de resistência. Cada sensor possui faixa de atuação específica, profundidade recomendada e resposta diferenciada conforme o tipo de solo. A instalação dos equipamentos deve ser feita com extremo cuidado, garantindo contato íntimo entre o sensor e o solo. Para culturas perenes, os sensores são colocados nas principais zonas de absorção radicular; para culturas anuais, instalam-se a profundidades correspondentes aos estágios iniciais, intermediários e finais do ciclo. A coleta de dados pode ocorrer de forma manual, com leituras diretas no visor dos sensores, ou automaticamente, por meio de *dataloggers* que enviam as informações para sistema remoto. A Figura 1 apresenta alguns exemplos de sensores utilizados no manejo via solo.

Os sensores mais simples e comuns são os tensiômetros, dispositivos longos e com uma cápsula porosa na extremidade. Como o nome sugere, são capazes de mensurar grandezas relacionadas à tensão com que as plantas exercem para absorver a água disponível no solo. Diante disso, nas últimas décadas houve o desenvolvimento de novas tecnologias que se baseiam nas propriedades eletromagnéticas do solo para a obtenção da umidade. O TDR consiste em uma sonda que envia um pulso elétrico, calculando as propriedades dielétricas do solo de acordo com o tempo de reflexão do pulso ao ponto de emissão. Como as propriedades dielétricas do solo podem variar de acordo com a quantidade de água, o dispositivo é capaz de estabelecer uma relação direta entre umidade do solo e o tempo de reflexão do impulso. O FDR, por sua vez, é uma sonda de proporções semelhantes ao TDR. Também mensura a umidade do solo de acordo com suas propriedades dielétricas, mas por meio da emissão de uma onda eletromagnética em diferentes frequências. Quanto maior a quantidade de água, menor a frequência detectada pelo sensor, estimando assim a umidade do solo.

Além da comparação com limites críticos como capacidade de campo, ponto de murcha permanente e ponto de reposição, o manejo via solo permite ainda que o produtor avalie a dinâmica da água ao longo do perfil, identificando camadas com maior retenção, zonas com drenagem excessiva ou regiões onde as raízes não estão explorando adequadamente o solo. Sensores instalados em múltiplas profundidades possibilitam compreender o avanço da frente de molhamento após a irrigação e monitorar a distribuição vertical da umidade, garantindo que a água aplicada realmente alcance a zona radicular ativa. Da mesma forma, ao registrar leituras ao longo do tempo, é possível estimar a frequência ideal de irrigação, definir lâminas mais precisas, evitar percolação profunda e reduzir perdas por evaporação superficial.

O manejo via solo também contribui para o entendimento de propriedades importantes, como a taxa de infiltração e a capacidade de armazenamento hídrico,

que variam significativamente entre diferentes tipos de solo e podem ser alteradas ao longo das safras devido a práticas de preparo, compactação ou acúmulo de matéria orgânica. Apesar de suas vantagens, o método exige atenção do usuário, pois sensores mal instalados, com má conexão ao solo ou instalados em locais não representativos da área podem gerar leituras incorretas. Assim, o sucesso dessa estratégia depende tanto do correto posicionamento e funcionamento dos sensores quanto da interpretação técnica dos dados, reforçando a necessidade de capacitação do produtor e acompanhamento contínuo das condições do solo.



Figura 1. Equipamentos utilizados no manejo da irrigação via solo. A: Tensiômetros; B: watermark; c: FDR. Fonte: Irriga Global, 2021.

MANEJO DA IRRIGAÇÃO VIA CLIMA

O manejo da irrigação baseado no clima fundamenta-se no princípio de que a demanda hídrica de uma cultura pode ser estimada a partir das condições atmosféricas. O elemento central dessa estratégia é o cálculo da Evapotranspiração de Referência (ETo), que representa a perda de água por evaporação do solo e transpiração de uma vegetação padrão bem irrigada.

Existem duas formas principais de estimar a ETo : por meio de estações meteorológicas, que coletam continuamente variáveis climáticas, sendo considerado mais robusto, e por meio do Tanque Classe A, um método mais simples (Figura 2).

O Tanque Classe A, consiste em um reservatório circular de aproximadamente 1,21 m de diâmetro e 25 cm de altura, preenchido com água e instalado sobre uma base nivelada, cercado por um quebra-vento a uma distância padronizada. A evaporação diária da água é medida por meio de uma régua de precisão, e os valores

obtidos são convertidos em ETo utilizando um coeficiente de correção denominado coeficiente do tanque (Kp), que varia de acordo com as condições de instalação, velocidade do vento e ambiente ao redor. Embora menos preciso do que métodos baseados em equações meteorológicas completas, o Tanque Classe A oferece resultados acessíveis, sendo empregado em propriedades agrícolas, especialmente onde não há estações meteorológicas disponíveis.

O cálculo da ETc por meio do Tanque Classe A envolve três etapas principais: medir a evaporação diária do tanque, converter essa evaporação em ETo utilizando o coeficiente do tanque (Kp) e, finalmente, multiplicar a ETo pelo coeficiente de cultura (Kc) para obter a evapotranspiração da cultura. O procedimento inicia-se com a leitura diária da lâmina evaporada no Tanque Classe A, realizada por uma régua limnimétrica instalada sobre o tanque. Essa leitura indica em milímetros a quantidade de água evaporada durante o período. Para transformar o valor observado na evaporação do tanque (Epan) na evapotranspiração de referência (ETo), é necessário aplicar o coeficiente do tanque (Kp), que varia geralmente entre 0,35 e 0,85, dependendo das condições de instalação, velocidade do vento, sombreamento e albedo da superfície ao redor (Equação 1). Ressalta-se que existem várias metodologias para o cálculo de Kp, mas estudos sugerem que um Kp fixo de 0,7 aparenta ser uma opção prática e com desempenho satisfatório (Cunha et al., 2013; Sentelhas e Folegatti, 2003) Como diferentes culturas apresentam diferentes características fisiológicas e distintas taxas de consumo hídrico ao longo do ciclo, é preciso ajustar a ETo por meio do Kc (Equação 2), para a obtenção da Evapotranspiração da Cultura (ETc).

$$ETo = Epan \cdot Kp \quad \text{Equação 1}$$

$$ETc = ETo \cdot Kc \quad \text{Equação 2}$$

As estações meteorológicas constituem o método mais utilizado, pois medem variáveis como temperatura do ar, umidade relativa, radiação solar, velocidade do vento e pressão atmosférica. Esses dados são utilizados em equações para o cálculo da ETo, como a de Penman-Monteith FAO-56, considerada referência mundial. A instalação das estações deve seguir critérios técnicos, posicionando os sensores em áreas abertas, afastadas de obstáculos que alterem o fluxo de vento ou a incidência solar, e em superfícies representativas da região. A partir da ETo, assim como utilizando o tanque classe A, determina-se a ETc, utilizando-se valores de Kc específicos para cada espécie e estágio fenológico (Equação 2). Dessa forma, a ETc expressa a quantidade de água efetivamente utilizada pela cultura em determinado período, permitindo ao produtor estimar a lâmina diária ou semanal que deverá ser repostada via irrigação. A partir desse valor, é possível ajustar o manejo considerando

a eficiência do sistema de irrigação, a profundidade efetiva das raízes, a precipitação útil e os limites de armazenamento do solo.

A ETo pode ser estimada por diferentes equações desenvolvidas ao longo do tempo por diversos autores, cada uma baseada em fundamentos físicos, empíricos ou combinados. Embora atualmente o método padrão recomendado internacionalmente seja o Penman-Monteith FAO-56 (Allen et al., 1998). Cada método exige um conjunto específico de variáveis climáticas, o que influencia tanto sua precisão quanto sua aplicabilidade prática em campo. O método Penman-Monteith FAO-56 é considerado o mais robusto e completo, pois integra variáveis energéticas e aerodinâmicas. Para seu cálculo, são necessários dados de radiação solar, temperatura do ar (máxima e mínima), velocidade do vento, umidade relativa e pressão atmosférica (Equação 3). Por combinar aspectos físicos do balanço de energia com características da difusão do vapor d'água, esse método é o mais preciso, porém também o que exige maior número de sensores.

$$ET_o = \frac{0,408 s(Rn - G) + \gamma \frac{900 U_2 (e_s - e_a)}{T + 273}}{s + \gamma(1 + 0,34 U_2)} \quad \text{Equação 3}$$

em que ETo é a evapotranspiração de referência, Rn é a radiação líquida total diária ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$); G é o fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$); γ é a constante psicrométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); T é a temperatura média do ar ($^\circ\text{C}$); U_2 é a velocidade do vento a 2m de altura (m s^{-1}); e_s é a pressão de saturação de vapor (kPa); e_a é a pressão parcial de vapor (kPa); e é a declividade da curva de pressão de vapor na temperatura do ar ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$).

Outro método é o de Hargreaves-Samani, desenvolvido como alternativa prática em condições em que apenas dados de temperatura estão disponíveis. Nessa equação, a ETo é estimada com base na temperatura média diária, temperatura máxima, temperatura mínima e na radiação extraterrestre calculada em função da posição geográfica. Trata-se de um método empírico, simples e bastante útil em regiões com escassez de informações meteorológicas completas.

O método Priestley-Taylor é outro importante modelo, aplicável especialmente em regiões úmidas ou onde a limitação de dados impede o uso de equações mais complexas. Ele utiliza como principais variáveis a radiação líquida e a temperatura do ar, ajustando a evapotranspiração por meio de um coeficiente empírico. Por depender menos de informações aerodinâmicas, torna-se particularmente útil em superfícies uniformes e com boa disponibilidade hídrica. O método Blaney-Criddle, também empírico, baseia-se na temperatura média diária e na porcentagem de horas de luz do dia ao longo do mês. Sua aplicação é recomendada somente em

condições climáticas específicas, geralmente em zonas temperadas, sendo menos indicado em regiões tropicais com variabilidade climática acentuada.



Figura 2. Exemplo de uma estação meteorológica e de tanque classe A utilizado na determinação do ETo.

A seguir é apresentado um exemplo do método via clima através do balanço hídrico. Este método combina o processo de cálculo da evapotranspiração com as propriedades hídricas do solo. Primeiramente, calcula-se a capacidade de água disponível (CAD) nos solo e a disponibilidade real de água (DRA), a partir da multiplicação com o fator de disponibilidade hídrica da cultura (Equações 4 e 5).

$$CAD = \frac{(U_{cc} - U_{pmp})}{10} \cdot ds \cdot z$$

Equação 4

$$DRA = CAD \cdot f$$

Equação 5

em que U_{cc} é a umidade da capacidade de campo (%); U_{pmp} é a umidade do ponto de murcha permanente (%); ds é a densidade do solo (g/cm^3); z é a profundidade radicular da cultura (cm), f é o coeficiente adimensional de disponibilidade hídrica, variando de 0 a 1 e que pode ser obtido na literatura específico para cada cultura.

O Quadro 1 apresenta um exemplo de cronograma de irrigação de acordo com o balanço hídrico baseado em dados climáticos.

Quadro 1. Exemplo do manejo da irrigação utilizando o balanço hídrico, considerando um solo com DRA = 39 mm

Dia	ETc (mm)	Chuva (mm)	Irrigação (mm)	DRA inicial (mm)	DRA final (mm)
1	5	0	0	39	34
2	6	0	0	34	28
3	5	0	0	28	23
4	4	0	0	23	19
5	4.5	0	0	19	14.5
6	6	0	0	14.5	8.5
7	5.5	0	30.5	39	33.5
8	5.5	0	0	33.5	28
9	5.5	45	0	39	33.5
10	6	0	0	33.5	27.5

MANEJO DA IRRIGAÇÃO VIA PLANTA

O manejo da irrigação baseado na planta assume que a própria planta é o melhor indicador de sua condição hídrica. Em vez de medir a demanda atmosférica ou o conteúdo de água no solo, esse método monitora respostas fisiológicas e morfológicas da planta que indicam estresse hídrico, permitindo ajustes rápidos e altamente precisos na irrigação. Essa estratégia se apoia em parâmetros como potencial hídrico foliar, temperatura da folha, taxa de crescimento, condutância estomática, variáveis espectrais e sinais biofísicos detectados por sensores ópticos e térmicos.

As metodologias para a determinação do estresse hídrico baseado em planta são os menos usuais na produção agrícola, sendo mais restrito ao campo da pesquisa até o presente momento. Isto se deve ao fato de que estas metodologias frequentemente requerem equipamentos de custo exacerbado ou procedimentos que exigem alta tecnicidade. O manejo via planta pode ser realizado por meio de instrumentos mais avançados, como câmeras térmicas, sensores infravermelhos, medidores portáteis de potencial hídrico (câmara de Scholander), fluorômetros, clorofilômetros, entre outros. A instalação e operação variam conforme o equipamento.

A alternativa mais acessível é o cálculo do conteúdo de água relativo (Relative Water Content, RWC) nas folhas (Equação 6), descrito por Barrs e Weatherley (1962). Todavia, a obtenção do RWC é demorada considerando o contexto do manejo da irrigação, sendo mais utilizada em pesquisas que buscam avaliar o conteúdo hídrico no tecido vegetal no decorrer do tempo.

$$RWC(\%) = \frac{FW - DW}{TW - DW} \cdot 100$$

Equação 6

em que FW refere-se ao peso da folha fresca; DW é o peso da folha seca após 24 horas em estufa a 105 °C; TW é o peso da folha túrgida, 24 horas após submersão em água destilada.

A câmara de Scholander (Figura 3) é um equipamento utilizado para medir o potencial hídrico da planta, permitindo avaliar de forma direta o nível de estresse hídrico. Seu funcionamento baseia-se no equilíbrio entre a pressão negativa existente dentro dos tecidos vegetais e uma pressão positiva aplicada externamente. Para realizar a medição, remove-se um pedaço da planta, geralmente um pedaço de folha com pecíolo ou apenas o pecíolo, preferencialmente no período mais representativo do estresse hídrico, como antes do amanhecer (potencial hídrico base). O pecíolo é inserido dentro da câmara, deixando sua extremidade cortada para fora, enquanto o restante da folha fica totalmente vedado no interior do equipamento. Quando a câmara é pressurizada, o operador aumenta gradualmente a pressão interna até o momento em que se observa o surgimento de um pequeno filme de água na extremidade exposta do pecíolo. Essa ocorrência indica que a pressão aplicada externamente igualou a força de sucção exercida pelos tecidos da planta, permitindo assim a leitura do potencial hídrico.

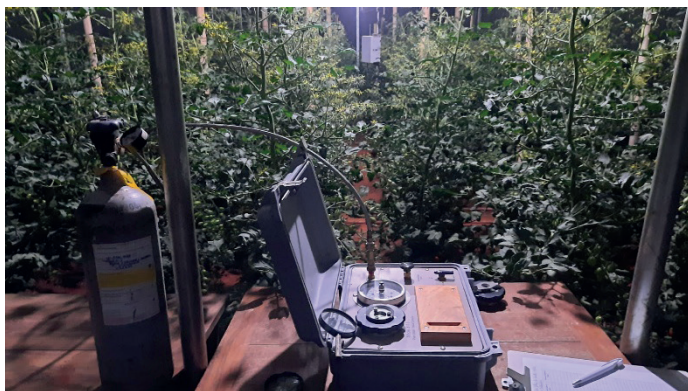


Figura 3. Câmara de Scholander utilizada para a determinação do potencial hídrico foliar.

A obtenção dos dados envolve medições realizadas em horários específicos, especialmente em períodos de maior demanda evaporativa, pois é nesses momentos que o estresse hídrico se manifesta com maior clareza. Os sensores comparam a temperatura ou o comportamento fisiológico da planta com referências pré-

estabelecidas, como índices térmicos de estresse (CWSI), curvas de potencial hídrico e variações espectrais. Com base nesses indicadores, o produtor pode determinar se a planta está utilizando mais água que o solo pode fornecer, se há restrição hídrica e qual é o momento ideal para irrigar. Embora seja uma estratégia extremamente sensível e precisa, sua limitação está no custo de alguns equipamentos e na necessidade de interpretação técnica dos resultados. Entretanto, com a popularização de sensores portáteis e drones, o manejo via planta tem se tornado cada vez mais acessível, consolidando-se como uma abordagem moderna, eficiente e focada no bem-estar fisiológico da cultura. Contudo, é um equipamento de alto custo, além de ser um processo destrutivo e muito trabalhoso.

Com a finalidade de evitar a destruição das amostras e desenvolver um processo mais prático e rápido utilizando metodologias baseadas em planta, técnicas recentes utilizando sensoriamento remoto com câmeras termais e sensores infravermelho estão sendo desenvolvidas, sendo projetos promissores uma vez que possuem a capacidade de determinar o estresse hídrico das plantas em tempo real, com o manejo da irrigação exercido de forma mais precisa.

PERSPECTIVAS FUTURAS

O futuro do manejo da irrigação aparenta se tornar cada vez mais tecnológico e otimizado, principalmente no contexto da Inteligência Artificial e suas subáreas, como o Aprendizado de Máquina. Neste sentido, existem avanços recentes na criação de sistemas de suporte de decisão que utilizam modelos matemáticos que descrevem o desenvolvimento da cultura e a disponibilidade de água do solo com o intuito de prever a lâmina do manejo da irrigação (Mokhtar et al., 2023).

Estudos recentes com sistemas de irrigação inteligentes utilizando a internet das coisas (Internet of Things, IoT) possuem o potencial de transformar o uso da água na agricultura, promovendo um manejo hídrico mais eficiente, redução no consumo de água, maior produtividade e menor impacto ambiental (Obaideen et al., 2022). Prevê-se que modelos de visão computacional permitirá que câmeras termais e sensores infravermelho poderão ser acoplados em Veículos Aéreos não Tripulados (VANT's) para fornecer a necessidade hídrica de plantas em tempo real.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A integração de métodos de monitoramento, como estimativas de evapotranspiração, avaliação da umidade ou tensão no solo e indicadores fisiológicos das plantas, permite decisões mais precisas no manejo da irrigação, contribuindo para sistemas produtivos mais resilientes diante da variabilidade climática e da crescente pressão sobre os recursos hídricos. A adoção dessas práticas em diferentes realidades agrícolas e sua ampla disseminação entre produtores de todos os níveis

reforçam o papel da irrigação bem manejada na construção de uma agricultura sustentável e eficiente.

REFERÊNCIAS

Barrs, H. D., Weatherley, P. E. A re-examination of the relative turgidity technique for estimating water deficits in leaves. *Australian journal of biological sciences*, 15, 413-428, 1962.

Bernardo, S; Mantovani, E.C; Silva, D.D; Soares, A.A. Manual de Irrigação. Viçosa: Editora UFV, 2019.

Bwambale, E., Abagal, F. K., Anornu, G. K. Smart irrigation monitoring and control strategies for improving water use efficiency in precision agriculture: A review. *Agricultural Water Management*, 260, 107324, 2022.

Irriga Global, Sensores de umidade do solo: irrigação eficiente e segurança no campo, 2021. Disponível em: <https://irrigaglobal.com/sensores-de-umidade-do-solo-irrigacao-eficiente-e-seguranca-no-campo/>.

Levin, A., Nackley, L. Principles and practices of plant-based irrigation management. *HortTechnology*, 31, 650-660, 2021.

Mokhtar, A. et al. Prediction of irrigation water requirements for green beans-based machine learning algorithm models in arid region. *Water resources management*, 37, 1557-1580, 2023.

Obaideen, K. et al. An overview of smart irrigation systems using IoT. *Energy Nexus*, 7, 100124, 2022.

Sentelhas, P. C., Folegatti, M. V. Class A pan coefficients (K_p) to estimate daily reference evapotranspiration (ET₀). *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 7, 111-115, 2003.

Zhao, H. et al. A review of scientific irrigation scheduling methods. In: 2023 11th International Conference on Agro-Geoinformatics (Agro-Geoinformatics). IEEE, 2023.