

Irrigação de precisão: construção de um conceito ligado ao *yield gap*

[Rafael Battisti](#), [Marcio Mesquita](#)

A irrigação de precisão está alinhada aos princípios da agricultura de precisão e pode ser entendida como uma estratégia de manejo que integra informações climáticas, edáficas, fisiológicas e operacionais, a fim de definir, com maior resolução temporal e espacial, quando e quanto irrigar. Seu objetivo não se restringe à reposição do déficit hídrico, mas sim a aumentar a produtividade, reduzir perdas e explorar de forma eficiente o potencial produtivo disponibilizado pelo ambiente irrigado.

Esse conceito parte da premissa central de que a água é um fator determinante da produtividade, porém, não atua isoladamente. Em muitas situações, a simples eliminação do déficit hídrico não é suficiente para que a cultura expresse o seu máximo potencial, porque limitações de solo, nutrição, população de plantas, fitossanidade, escolha de genótipo e qualidade operacional continuam atuando sobre o sistema produtivo. Dessa forma, o manejo da irrigação deve ser interpretado dentro do conjunto de fatores que compõem a eficiência agrícola.

Eficiência agrícola e 'yield gap'

A relação entre disponibilidade hídrica, manejo e produtividade pode ser analisada a partir do conceito de *yield gap*. Nesse referencial, a produtividade potencial (PP) representa o nível de produtividade condicionado pela interação entre genótipo, radiação solar, temperatura, fotoperíodo e duração do ciclo, considerando a ausência de limitação hídrica e o manejo adequado. A produtividade atingível (PA) corresponde à produtividade potencial limitada pelo déficit hídrico ao longo do ciclo. Por sua vez, a produtividade real do produtor (PR) resulta da pro-

ductividade atingível após a incidência das limitações associadas ao manejo agrícola, como fertilidade, implantação da lavoura, população de plantas, fitossanidade e demais fatores redutores de rendimento.

A eficiência climática (EC) expressa a proporção da produtividade potencial que permanece disponível após o efeito do déficit hídrico e pode ser representada pela razão $EC = PA/PP$. A eficiência agrícola ou de manejo (EA), por outro lado, representa a capacidade do sistema produtivo de converter a produtividade atingível em produtividade efetivamente colhida, sendo expressa por $EA = PR/PA$. Assim, valores elevados de eficiência climática indicam menor penalização causada pela disponibilidade hídrica, enquanto valores elevados de eficiência agrícola indicam melhor aproveitamento, por meio do manejo, do potencial disponibilizado pelo ambiente.

Essa interpretação é particularmente importante para sistemas irrigados. A irrigação reduz ou elimina parte do *yield gap* associado ao déficit hídrico, diferença entre PP e PA, ampliando o potencial produtivo disponível para a cultura ([Sentelhas et al., 2015](#)). Entretanto, à medida que a limitação hídrica é reduzida, a importância relativa de outros componentes do sistema aumenta. Em outras palavras, a irrigação cria uma oportunidade produtiva, mas a magnitude da produtividade efetivamente colhida dependerá da eficiência com que o solo, a planta, a nutrição, a proteção de cultivos e as operações de manejo são integrados.

Déficit hídrico realmente é o problema principal?

[Battisti et al. \(2018\)](#), ao avaliarem 200 áreas participantes do Desafio Nacional de Máxima

Produtividade de Soja do Comitê Estratégico Soja Brasil (CESB), demonstraram que a limitação hídrica não explicava isoladamente as diferenças de produtividade observadas. A eficiência climática foi superior a 80% em 36% das áreas e situou-se entre 60 e 80% em 50% delas; somente 13,5% apresentaram eficiência climática inferior a 60%, condição crítica de disponibilidade hídrica. Em contraste, 56% das áreas apresentaram eficiência agrícola inferior a 60%; 32% entre 60 e 80%; e apenas 11% superaram 80%. Esses resultados evidenciam que, embora o clima controle uma parcela importante da expressão do potencial produtivo, o manejo subótimo pode impedir que condições hídricas favoráveis sejam convertidas em alta produtividade.

Do manejo convencional à irrigação de precisão

A resposta clássica da cultura à lâmina de irrigação pode ser representada por uma curva em que, sob baixas lâminas, a produtividade é limitada pela disponibilidade de água. À medida que a lâmina aumenta e o déficit hídrico é reduzido, a produtividade se eleva até atingir uma faixa ótima. Acima desse intervalo, incrementos adicionais de água

deixam de proporcionar ganho produtivo e podem, em determinadas condições, reduzir a produtividade pela baixa aeração do solo, encharcamento, lixiviação de nutrientes, escoamento superficial e erosão, além de criar condições microclimáticas favoráveis à ocorrência de determinadas doenças (Figura 1).

Na representação conceitual proposta na Figura 1, a curva azul expressa uma situação intermediária, com eficiência agrícola próxima de 60%, e representa a lógica convencional de otimização da lâmina de irrigação. Entretanto, muitas áreas produtivas operam com eficiência agrícola inferior a 50%, situação representada pela curva vermelha. Nesses ambientes, o teto produtivo é mais baixo porque outros fatores de manejo restringem a resposta da cultura. Quando a água é interpretada como o principal ou único fator limitante, existe o risco de aumentar a lâmina de irrigação na tentativa de compensar uma produtividade aquém do esperado. Como a limitação dominante não está necessariamente na água, esse incremento não fecha o *yield gap* de manejo e pode deslocar o sistema para uma faixa de aplicação excessiva, com perda de eficiência e possível penalização da produtividade.

A proposta da irrigação de precisão é representada conceitualmente pela curva verde (Figura 1),

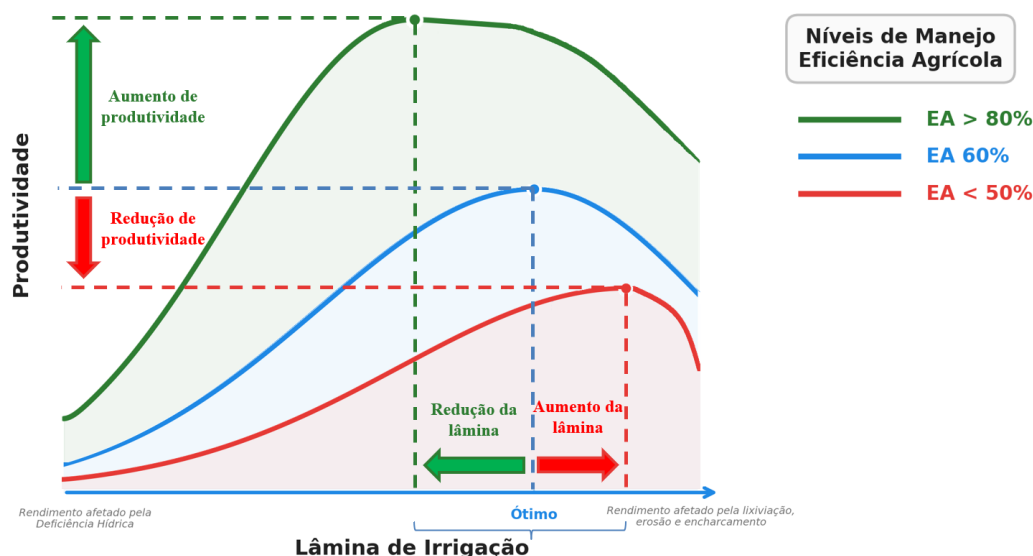


Figura 1. Relação entre lâmina de irrigação e produtividade teórica para três níveis de eficiência agrícola (EA), e os impactos sobre a lâmina de irrigação e produtividade. A curva vermelha representa baixa eficiência de manejo (< 50%), a azul uma eficiência intermediária (~ 60%) e a verde maior eficiência (> 80%).

associada a maior eficiência agrícola; por exemplo, acima de 80%. Nesse cenário, a melhoria integrada do manejo desloca a resposta produtiva para níveis superiores e aumenta a produtividade obtida por unidade de água aplicada. Consequentemente, determinada meta de produtividade pode ser alcançada com menor lâmina, e o intervalo de lâminas associado à máxima produtividade tende a se tornar operacionalmente mais robusto. Em termos práticos, o objetivo deixa de ser simplesmente aplicar água até atingir o máximo rendimento e passa a ser maximizar a produtividade com a menor lâmina compatível com estabilidade produtiva e segurança do sistema. Esse deslocamento de enfoque é central para a irrigação de precisão. A eficiência deixa de ser avaliada apenas pela uniformidade de aplicação ou pela reposição da evapotranspiração e passa a incluir a capacidade do sistema produtivo de transformar a água aplicada em rendimento econômico.

*Exemplo em milho safrinha irrigado
no Vale do Araguaia*

A interação entre disponibilidade hídrica e eficiência agrícola pode ser exemplificada por dados de milho safrinha obtidos em duas safras

consecutivas na região do Vale do Araguaia, no estado de Goiás (Figura 2). Na safra de 2024, as condições hídricas naturais permitiriam uma produtividade atingível estimada de 128 sc ha⁻¹. A irrigação compensou parte dessa limitação, acrescentando 67 sc ha⁻¹ ao ambiente produtivo e elevando o patamar de produtividade de referência para 195 sc ha⁻¹. A produtividade efetivamente obtida foi de 145 sc ha⁻¹, correspondente a uma eficiência agrícola de 74%, em relação ao potencial disponibilizado pelo sistema irrigado.

Na safra de 2025, a restrição hídrica foi substancialmente maior. Sem irrigação, a produtividade atingível estimada foi de 77 sc ha⁻¹. A suplementação hídrica adicionou cerca de 106 sc ha⁻¹, elevando o patamar produtivo de referência para 183 sc ha⁻¹. A produtividade real foi de 143 sc ha⁻¹, valor muito próximo ao obtido na safra anterior, mas correspondente a uma eficiência agrícola de 78%. Portanto, mesmo sob condição meteorológica mais restritiva, o sistema apresentou maior capacidade de converter o potencial disponibilizado pela irrigação em produtividade efetivamente colhida.

A comparação entre as duas safras mostra que a produtividade real, analisada isoladamente,



Figura 2. Produtividade atingível sem irrigação, incremento de produtividade proporcionado pela irrigação, produtividade real e eficiência agrícola (EA) do milho safrinha nas safras de 2024 e 2025, no Vale do Araguaia, Goiás.

poderia sugerir estabilidade ou até pequena redução do desempenho. Entretanto, quando interpretada em relação ao potencial de cada ambiente, observa-se aumento da eficiência agrícola de 74 para 78%. Esse ganho esteve associado ao aprimoramento integrado do manejo, incluindo ajustes no manejo da irrigação, na população de plantas, na adubação e no manejo fitossanitário. O exemplo reforça que a avaliação de sistemas irrigados deve considerar não apenas a produtividade final, mas também a eficiência com que o sistema explora o potencial produtivo disponibilizado.

Irrigação de precisão no sistema solo-planta-atmosfera

A irrigação de precisão deve ser estruturada a partir da integração do sistema solo-planta-atmosfera. Esses três componentes determinam, conjuntamente, a oferta de água, a capacidade de armazenamento e exploração do perfil, a demanda hídrica da cultura e a resposta produtiva. A informação gerada por sensores, estações meteorológicas, mapas de solo, monitoramento da cultura, telemetria, sensoriamento remoto e plataformas de apoio à decisão deve ser utilizada para conectar esses componentes e orientar o manejo em escala temporal e espacial.

O solo constitui o principal reservatório de água disponível à cultura e, por isso, é um componente fundamental da irrigação de precisão. A quantidade de água efetivamente acessível às raízes depende não apenas da textura e da capacidade de retenção de água, mas também da profundidade explorável do perfil e da ausência de restrições físicas e químicas ao crescimento radicular. O conhecimento da variabilidade espacial de atributos como teor de argila, pH, fertilidade, disponibilidade de micronutrientes, incluindo boro quando relevante para a cultura, densidade e resistência do solo à penetração permite identificar zonas com diferentes capacidades de armazenamento e fornecimento de água.

A planta é o elemento que converte os recursos do ambiente em produtividade e, portanto,

define a resposta agrônômica ao manejo hídrico. A escolha do genótipo, a população de plantas, a época de semeadura, o ciclo, a arquitetura do dossel e do sistema radicular e o nível tecnológico adotado determinam o potencial produtivo que poderá ser explorado em cada ambiente. Assim, a irrigação de precisão deve ser planejada em função do sistema de produção que se pretende sustentar, e não como uma operação isolada.

Já a atmosfera estabelece a demanda evaporativa à qual a cultura está submetida e, em interação com as características da planta, determina a evapotranspiração da cultura. Variáveis como radiação solar, temperatura, umidade relativa e vento controlam a evapotranspiração de referência, enquanto o estágio de desenvolvimento e as características do dossel condicionam a conversão dessa demanda atmosférica em necessidade hídrica da cultura. O monitoramento meteorológico é, portanto, essencial para definir a intensidade e a frequência das irrigações ao longo do ciclo, devendo, além da variabilidade temporal, amplamente reconhecida no planejamento agrícola, considerar a variabilidade espacial das condições meteorológicas, sobretudo da precipitação ([Santos et al., 2025](#))

Integração de dados e tomada de decisão

A transição para a irrigação de precisão depende da transformação de dados em decisões de manejo. Informações meteorológicas permitem estimar a demanda atmosférica e contabilizar a precipitação; os dados de solo indicam a capacidade de armazenamento e a profundidade efetiva de exploração; e o monitoramento da planta informa o estado da cultura, o estágio fenológico e possíveis sinais de estresse. Integradas em plataformas digitais e sistemas de apoio à decisão, essas informações permitem atualizar continuamente o balanço hídrico e identificar, espacialmente, quando, quanto e onde, de acordo com a variabilidade das características do solo, a reposição de água é necessária.

A integração pode ser suportada pela agricultura de precisão, que evoluiu de um manejo baseado

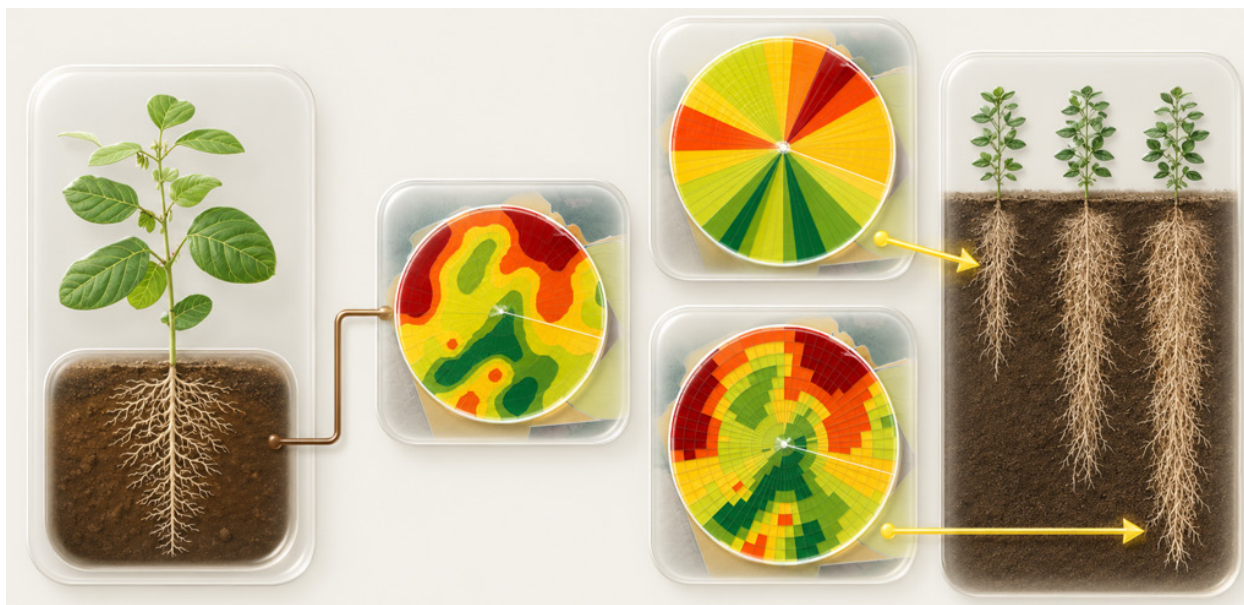


Figura 3. Representação dos níveis de espacialização do manejo hídrico sob pivô central: manejo uniforme da área, particionamento por quadrantes ou zonas e caracterização de unidades específicas segundo o conteúdo de água, a profundidade efetiva do solo e a água disponível à cultura.

em valores médios da área para o particionamento em zonas de manejo, como apresentado no primeiro mapa da esquerda da Figura 3. Um avanço inicial seria a possibilidade de o conteúdo de água no solo ser definido por quadrantes do pivô; em níveis mais avançados, cada zona pode ser caracterizada quanto à água disponível, profundidade efetiva do sistema radicular e capacidade de armazenamento do perfil (Figura 3). Quando associado a sistemas de aplicação em taxa variável, esse conhecimento permite ajustar a lâmina às diferenças espaciais do solo e reduzir simultaneamente o déficit e o excesso de irrigação.

Considerações finais

A irrigação de precisão pode ser definida como uma estratégia integrada de manejo que combina informações de clima, solo, planta e ferramentas digitais para definir quando irrigar, quanto aplicar e como distribuir a lâmina de irrigação espacialmente, de acordo com a variabilidade das características do solo. Seu objetivo é aumentar a eficiência do uso da água e a produtividade por

meio da redução simultânea do déficit hídrico e das limitações de manejo que impedem a cultura de explorar o potencial produtivo disponibilizado pela irrigação.

Nesse conceito, o suporte hídrico é apenas uma parte da estratégia. O ganho efetivo de produtividade depende da capacidade de integrar a irrigação ao ambiente climático, à construção e à variabilidade do perfil do solo, ao sistema de produção e às respostas da planta. A irrigação de precisão, portanto, não significa simplesmente aplicar água com maior exatidão, mas utilizar informação para reconhecer os fatores limitantes, ajustar o manejo e converter o potencial hídrico e produtivo do ambiente em rendimento efetivamente colhido.

Em síntese, a meta é alcançar alta produtividade com a menor lâmina necessária para sustentar o potencial do sistema, preservando uma faixa operacional de maior estabilidade e reduzindo perdas por déficit ou excesso de água. Essa visão amplia o conceito tradicional de eficiência de irrigação e posiciona o manejo hídrico como componente de um sistema integrado de agricultura de precisão baseado na interação solo-planta-atmosfera.