CAPÍTULO 1

MANEJO DA ÁGUA E SANIDADE VEGETAL: COMO A IRRIGAÇÃO MODULA A EPIDEMIOLOGIA DE DOENÇAS DE PLANTAS

DOI DO CAPÍTULO: 10.29327/5963730.1-1

João Vitor Trindade de Souza, e-mail: vitor.trindade0406@gmail.com, URL lattes: https://lattes.cnpq.br/3617110704213189
Jozadake Petry Fausto, e-mail: jozadakepetryfausto@gmail.com, URL lattes: http://lattes.cnpq.br/3339996527225371
Gabrielle Ferreira de Lira, e-mail: gabrielle.lira@ceca.ufal.br, URL lattes: http://lattes.cnpq.br/1312682876827043
José Vitor da Silva Nunes, e-mail: vitor4899@gmail.com, URL lattes: https://lattes.cnpq.br/9593210495913688
Giselle Silva de Souza, e-mail: giselle.silva908@gmail.com URL lattes: http://lattes.cnpq.br/7391062473926377
Josilene Pereira Silva, e-mail: pereirasilvajosilene41@gmail.com, URL lattes: http://lattes.cnpq.br/5717569162096842

RESUMO

A irrigação influencia a epidemiologia das doenças de plantas ao modificar a umidade do solo, o molhamento foliar, o microclima do dossel e a dispersão de inóculo. Este capítulo objetivou discutir como o manejo da água interfere na ocorrência e no progresso das doenças, considerando a qualidade da água, os métodos de irrigação e as decisões operacionais. Foi realizada uma revisão narrativa, qualitativa e descritivo-analítica da literatura, com ênfase em estudos publicados entre 2005 e 2024, além de referências clássicas relevantes. As evidências demonstram que a aspersão pode prolongar o molhamento dos tecidos e favorecer a dispersão de propágulos por respingos, enquanto o gotejamento reduz o contato da água com a parte aérea, embora possa aumentar a umidade localizada na rizosfera. Verificou-se também que rios, reservatórios, canais e sistemas de recirculação podem transportar fungos, oomicetos e bactérias fitopatogênicas. A frequência, a duração e o horário das aplicações determinam a formação de condições favoráveis à infecção, especialmente quando coincidem com temperaturas adequadas ao patógeno. Sensores, informações meteorológicas e modelos de previsão podem auxiliar na definição das lâminas e dos momentos de irrigação. Conclui-se que o manejo hídrico deve integrar as estratégias de manejo de doenças, associando monitoramento, manutenção da rede, qualidade da água e adequação das aplicações para reduzir a disseminação de patógenos e o progresso das epidemias.

PALAVRAS-CHAVE: fitopatógenos; molhamento foliar; microclima do dossel; dispersão de inóculo; irrigação de precisão.

1. INTRODUÇÃO

A água ocupa posição estratégica na agricultura, pois influencia tanto o desenvolvimento das culturas quanto às interações entre plantas e microrganismos. A irrigação reduz os efeitos da irregularidade das chuvas e do déficit hídrico, contribuindo para a estabilidade produtiva (Aung *et al*., 2018). Entretanto, também modifica a umidade do solo, o molhamento dos tecidos vegetais e o microclima do dossel, fatores diretamente relacionados à ocorrência de doenças (Agrios, 2005). Portanto, seus efeitos sobre a sanidade vegetal dependem da cultura, do patógeno, do método de aplicação e das condições meteorológicas (Swett *et al*., 2020).

O desenvolvimento das doenças resulta da interação entre hospedeiro suscetível, patógeno virulento e ambiente favorável ao longo do tempo. Nesse processo, a água interfere na sobrevivência, germinação, dispersão e penetração dos propágulos infectivos. Huber e Gillespie (1992) destacam que a duração da disponibilidade hídrica pode determinar a ocorrência da infecção e a velocidade das epidemias. Além disso, a presença de água na superfície vegetal favorece a sobrevivência e a multiplicação de microrganismos (Beattie, 2011), enquanto seu deslocamento pode transportar inóculo dentro da área cultivada ou entre diferentes unidades de produção (González-Domínguez *et al*., 2020).

Esses efeitos são mais evidentes quando a água alcança a parte aérea das plantas. A irrigação por aspersão forma filmes de água sobre folhas, flores e frutos, aumenta a umidade no interior do dossel e produz respingos capazes de transportar células bacterianas, esporos e tecidos infectados. O horário e a duração da aplicação determinam o período de molhamento foliar (Montazar *et al*., 2019), que, quando associado a temperaturas favoráveis, possibilita a germinação, a penetração e a colonização dos tecidos por diferentes fitopatógenos (Kim *et al*., 2019; Swett *et al*., 2020).

Em contraste, sistemas localizados, como o gotejamento, reduzem o contato da água com a parte aérea e podem limitar doenças dependentes do molhamento foliar e da dispersão por respingos (Montazar *et al*., 2019). Contudo, irrigações frequentes, volumes excessivos ou drenagem insuficiente mantêm o solo úmido, reduzem sua aeração e favorecem patógenos associados às raízes e ao colo. Dessa forma, nenhum método pode ser considerado universalmente favorável ou desfavorável à sanidade vegetal, pois seus efeitos variam conforme o patossistema e as condições de manejo (Swett *et al*., 2020; Wilson *et al*., 2024).

A qualidade fitossanitária da água também representa um componente relevante. Rios, canais, açudes, reservatórios e sistemas de recirculação podem abrigar propágulos de fungos, oomicetos e bactérias (Baroudy *et al*., 2018; Redekar *et al*., 2019). Quando essas fontes são utilizadas, a rede de irrigação pode transportar e distribuir o inóculo para áreas ainda não afetadas, especialmente em sistemas com recirculação (Rodríguez-Padrón *et al*., 2019). Assim, a irrigação pode conectar fontes de inóculo a hospedeiros suscetíveis e ampliar a disseminação dos fitopatógenos (Calderon *et al*., 2023).

Diante disso, o manejo da irrigação deve considerar a quantidade, a origem, a qualidade, a frequência, o horário e a forma de aplicação da água. O monitoramento da umidade do solo e do molhamento foliar, a adequação dos turnos de rega, a inspeção das fontes hídricas e o uso de tecnologias de precisão podem reduzir condições favoráveis às doenças (Montazar *et al*., 2019; Wilson *et al*., 2024). Assim, este capítulo objetiva discutir como o manejo da água

modula a epidemiologia das doenças de plantas, com ênfase no microclima, no molhamento foliar, na umidade do solo, na dispersão do inóculo, na qualidade da água e nos métodos de irrigação, destacando sua importância para o manejo integrado de doenças.

2. METODOLOGIA

O presente capítulo caracteriza-se como uma revisão narrativa da literatura, de abordagem qualitativa, caráter descritivo e analítico, desenvolvida com o propósito de reunir, interpretar e integrar evidências científicas sobre as relações entre o manejo da água e a epidemiologia das doenças de plantas. A revisão concentrou-se nos mecanismos pelos quais a irrigação interfere no microclima dos cultivos, no estado fisiológico das plantas e nas diferentes etapas do ciclo dos fitopatógenos, bem como nas implicações dessas relações para o manejo integrado de doenças.

A pesquisa foi orientada pela seguinte questão: de que modo as decisões relacionadas à irrigação podem atender às necessidades hídricas das culturas e, simultaneamente, reduzir as condições favoráveis à ocorrência e ao progresso de doenças de plantas? Para responder a essa questão, foram consultadas publicações científicas e técnico-científicas relacionadas à irrigação agrícola, às relações hídricas na interação planta–microrganismo, ao molhamento foliar, à umidade do solo, à dispersão de propágulos, à qualidade fitossanitária da água e ao manejo integrado de doenças.

As buscas bibliográficas abrangeram estudos publicados principalmente entre 2005 e 2024, sem excluir referências clássicas consideradas indispensáveis à fundamentação dos conceitos de epidemiologia vegetal, infecção, dispersão de inóculo e modelagem do período de molhamento foliar. A estratégia de busca empregou descritores em português e inglês, combinados por meio dos operadores booleanos AND e OR, incluindo os termos *irrigation*, *plant disease*, *plant disease epidemiology*, *water management*, *leaf wetness*, *soil moisture*, *pathogen dispersal*, *irrigation water quality*, *waterborne plant pathogens*, *precision irrigation* e *integrated disease management*, além de suas correspondências em português.

Foram priorizados artigos científicos, revisões, capítulos de livros e documentos técnico-científicos que apresentassem relação direta com a influência da irrigação sobre a sobrevivência, disseminação, germinação, infecção ou reprodução de fitopatógenos. Também foram considerados estudos que avaliassem os efeitos dos métodos, horários, frequências e volumes de irrigação sobre o microclima, o molhamento da parte aérea, a umidade do solo e a ocorrência de doenças. Foram excluídas publicações sem relação direta com a questão orientadora, estudos voltados exclusivamente à produtividade ou à fisiologia vegetal sem

avaliação fitossanitária e documentos que não apresentassem informações suficientes para a interpretação dos resultados.

Após a identificação das publicações, procedeu-se à leitura dos títulos e resumos para verificar sua adequação aos objetivos do capítulo. Os trabalhos potencialmente relevantes foram examinados integralmente, considerando-se a clareza metodológica, a pertinência temática e a contribuição para a compreensão das relações entre irrigação e epidemiologia. Por se tratar de uma revisão narrativa, a seleção das fontes não teve como finalidade produzir uma estimativa quantitativa combinada dos efeitos, mas construir uma síntese crítica e aplicada dos mecanismos descritos em diferentes culturas, sistemas de irrigação e patossistemas.

As informações extraídas dos estudos foram organizadas considerando autor e ano de publicação, cultura avaliada, agente causal, método de irrigação, origem e qualidade da água, compartimento vegetal afetado, condições ambientais e etapa do ciclo da doença influenciada. Também foram examinados o horário, a frequência e a duração da irrigação, quando essas informações estavam disponíveis. A comparação entre os trabalhos buscou identificar resultados convergentes, divergências e respostas dependentes do contexto, reconhecendo que os efeitos observados em determinada combinação entre hospedeiro, patógeno e ambiente não podem ser automaticamente extrapolados para outros sistemas produtivos.

A síntese das evidências foi estruturada em seis eixos temáticos: água como reguladora do processo epidemiológico; microclima, molhamento e infecção; influência da arquitetura e do método de irrigação; transporte e disseminação de inóculo pela água; decisões operacionais voltadas à supressão de epidemias; e irrigação de precisão, limitações e perspectivas. Essa organização permitiu integrar conhecimentos epidemiológicos e agronômicos, convertendo os resultados da literatura em fundamentos aplicáveis ao planejamento conjunto do manejo hídrico e da sanidade vegetal.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 A água como reguladora do processo epidemiológico

A disponibilidade de água regula diferentes etapas do processo epidemiológico, desde a sobrevivência e a disseminação do inóculo até a infecção, a colonização e a expressão dos sintomas. Na superfície vegetal, a água livre reidrata estruturas dormentes, favorece a germinação de esporos e facilita o deslocamento de células bacterianas até estômatos, hidatódios e ferimentos (Beattie, 2011). No solo, o conteúdo hídrico interfere na aeração, na difusão de nutrientes, na atividade microbiana e na mobilidade de propágulos, especialmente

dos zoósporos produzidos por oomicetos (Agrios, 2005; Hossain *et al*., 2024). A hidratação também altera as condições físicas e nutricionais dos espaços intercelulares da planta, podendo favorecer a multiplicação de determinados patógenos. Dessa forma, a água atua como elemento integrador entre as condições ambientais, a fisiologia do hospedeiro e a atividade do agente causal (Aung *et al*., 2018).

O efeito epidemiológico da água depende não apenas da quantidade disponível, mas também da duração e da frequência do molhamento e do compartimento vegetal atingido. Eventos breves podem não proporcionar o tempo necessário à germinação e à penetração, enquanto aplicações repetidas renovam a água livre e prolongam as condições favoráveis à infecção. Para muitos patógenos foliares, a duração do molhamento determina o período disponível para ativação do inóculo e estabelecimento da doença (Huber; Gillespie, 1992). Por essa razão, modelos epidemiológicos combinam frequentemente a temperatura com o número de horas de molhamento para estimar o risco de infecção. Embora muitos fungos necessitem de várias horas contínuas de umidade, o intervalo crítico varia conforme a espécie do patógeno, o isolado, o hospedeiro e as condições ambientais (Agrios, 2005; Hossain *et al*., 2024).

Figura 1. Participação da água nas principais etapas do processo epidemiológico das doenças de plantas, considerando seus efeitos na superfície vegetal, no solo, na rizosfera e no interior dos tecidos.



Fonte: Elaborada pelos autores com auxílio da inteligência artificial generativa ChatGPT, da OpenAI, com base em Beattie (2011), Aung *et al.* (2018), Ekanayake *et al.* (2022), Gentzel *et al.* (2022) e Nomura *et al.* (2023).

No solo, os efeitos da água dependem da intensidade e da duração da condição hídrica. A saturação prolongada reduz a aeração, prejudica as raízes e aumenta a predisposição das plantas a podridões radiculares e vasculares (Swett *et al*., 2020). Em contrapartida, o déficit hídrico compromete o crescimento e as respostas de defesa vegetal (Aung *et al*., 2018). O manejo deve, portanto, atender à demanda da cultura sem prolongar a saturação do solo ou o molhamento dos órgãos suscetíveis (Agrios, 2005; Hossain *et al*., 2024).

A água também participa das estratégias de virulência de alguns fitopatógenos. Efetores de *Pseudomonas syringae* promovem a hidratação do apoplasto e formam microambientes favoráveis à multiplicação bacteriana e ao aparecimento de sintomas encharcados (Ekanayake *et al*., 2022). Em milho, esse processo também favorece a obtenção de compostos do hospedeiro por *Pantoea stewartii* (Gentzel *et al*., 2022). Nomura *et al*. (2023) demonstraram que efetores da família AvrE formam canais permeáveis à água e a pequenos solutos, promovendo o acúmulo de água e nutrientes no apoplasto e reduzindo respostas de defesa, como a deposição de calose. A planta, por sua vez, pode restringir a disponibilidade de água para limitar o crescimento microbiano (Beattie, 2011). A luminosidade também interfere nesse processo, pois intensifica a sinalização mediada pelo ácido salicílico e dificulta a formação de microambientes aquosos induzidos por *P. syringae* (Lajeunesse *et al*., 2023).

Essas relações apresentam implicações diretas para o manejo da irrigação. Aplicações no final da tarde ou à noite podem prolongar o molhamento do dossel e ampliar o período favorável à infecção, embora esse efeito dependa da cultura, do patógeno e das condições meteorológicas (Huber; Gillespie, 1992; Hossain *et al*., 2024). O horário da irrigação também pode influenciar a transpiração, o funcionamento estomático e a hidratação dos tecidos (Lajeunesse *et al*., 2023). Portanto, o princípio epidemiológico central consiste em fornecer água suficiente à cultura, reduzindo a coincidência entre inóculo viável, tecido suscetível e ambiente hídrico favorável à infecção (Beattie, 2011; Nomura *et al*., 2023).

3.2 Microclima do dossel, molhamento foliar e janelas de infecção

O microclima no interior do dossel pode diferir das condições registradas por estações meteorológicas externas. Densidade de plantas, área foliar, sombreamento e circulação do ar determinam a interceptação das gotas e a velocidade de secagem dos tecidos, produzindo variações na temperatura, na umidade e na duração do molhamento foliar (Rowlandson *et al*., 2015). A irrigação por aspersão modifica temporariamente esse ambiente ao depositar água sobre folhas, flores e frutos. Como diversos fitopatógenos dependem de períodos específicos

de molhamento, pequenas alterações na permanência da água livre podem modificar o risco de infecção (Huber; Gillespie, 1992; Hossain *et al*., 2024).

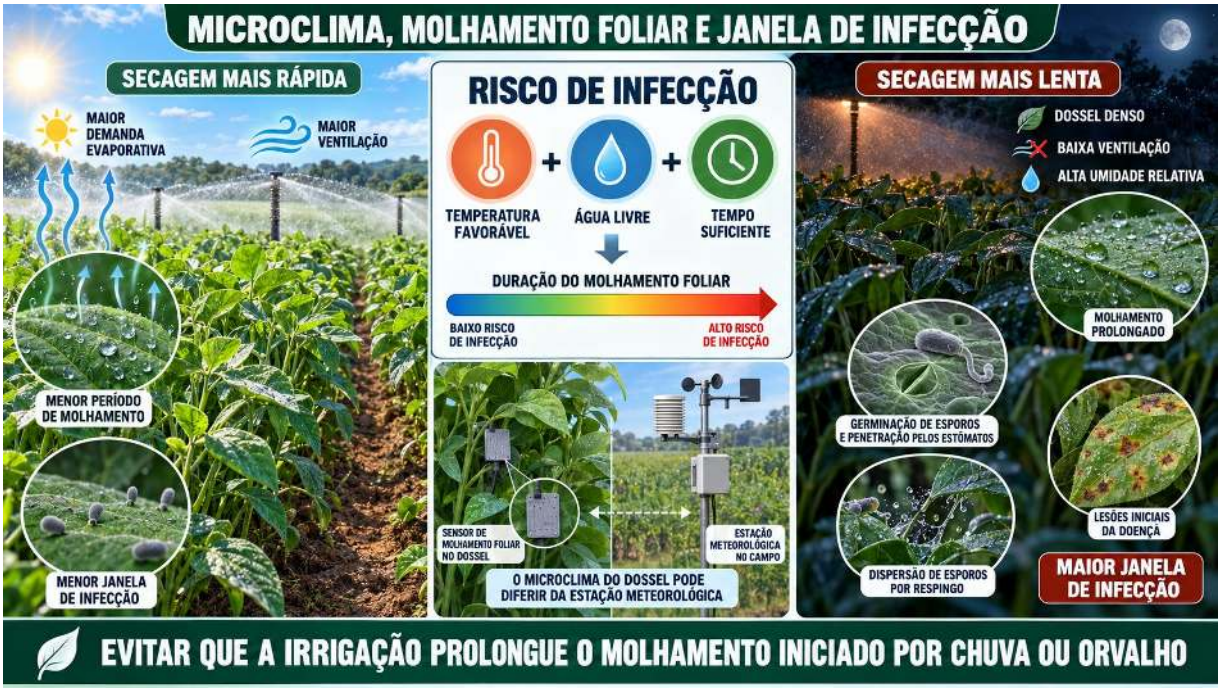
A duração do molhamento deve ser analisada em conjunto com a temperatura, pois a infecção ocorre quando ambas coincidem com as exigências do patógeno (Huber; Gillespie, 1992). Essa relação fundamenta modelos de previsão e sistemas de alerta fitossanitário. Entretanto, a precisão das estimativas depende da instalação e da representatividade dos sensores. Equipamentos posicionados em locais muito ventilados ou expostos ao sol podem indicar a secagem antes que ela ocorra nas camadas internas do dossel (Rowlandson *et al*., 2015). Por isso, o monitoramento deve reproduzir as condições dos órgãos mais suscetíveis (González-Domínguez *et al*., 2023).

Na aspersão, a pressão, a altura dos emissores, o tamanho das gotas e a interceptação pelo dossel influenciam a distribuição da água e o tempo de molhamento. O impacto das gotas também pode liberar e transportar propágulos presentes em lesões, resíduos culturais e superfícies contaminadas (Kim *et al*., 2019). O horário da aplicação interfere nesse processo, pois irrigações noturnas ou no final da tarde tendem a prolongar a umidade do dossel. Embora não exista um horário universalmente seguro, deve-se priorizar períodos que favoreçam a secagem e evitar que a irrigação prolongue o molhamento iniciado por chuva, orvalho ou condensação (Rowlandson *et al*., 2015; Belo *et al*., 2023; Hossain *et al*., 2024).

A sequência dos eventos meteorológicos também precisa ser incorporada ao planejamento. Uma irrigação realizada após chuva ou durante a formação de orvalho pode unir períodos inicialmente descontínuos de umidade, originando uma janela suficientemente longa para completar a infecção. Da mesma forma, irrigar antes de uma precipitação prevista pode ser agronomicamente redundante e ampliar a favorabilidade ambiental. González-Domínguez *et al.* (2023) destacam que a integração entre dados meteorológicos e modelos de risco melhora a oportunidade das intervenções fitossanitárias.

Nesse contexto, o acompanhamento da umidade do solo, da evapotranspiração e da previsão de chuva permite antecipar, adiar, reduzir ou fracionar a lâmina de irrigação (Belo *et al*., 2023). Essa abordagem mantém a cultura fora do estresse hídrico e, ao mesmo tempo, reduz a coincidência entre inóculo viável, tecidos suscetíveis e períodos prolongados de molhamento favoráveis ao patógeno (Hossain *et al*., 2024).

Figura 2. Influência do microclima do dossel, do horário da irrigação e das condições meteorológicas sobre a duração do molhamento foliar e a janela de infecção dos fitopatógenos.



Fonte: Elaborada pelos autores com auxílio da inteligência artificial generativa ChatGPT, da OpenAI, com base em Huber e Gillespie (1992), Rowlandson *et al.* (2015), Kim *et al.* (2019), González-Domínguez *et al.* (2023) e Hossain *et al.* (2024).

3.3 Arquitetura da irrigação e perfis de risco fitossanitário

Os métodos de irrigação distribuem a água em diferentes compartimentos do agroecossistema e, consequentemente, apresentam perfis epidemiológicos distintos. A aspersão amplia o contato da água com a parte aérea, prolonga o molhamento e pode favorecer doenças foliares, sobretudo aquelas causadas por patógenos disseminados por respingos (Agrios, 2005). O gotejamento concentra a aplicação na zona radicular e tende a manter folhas, flores e frutos secos, reduzindo condições favoráveis à infecção da parte aérea. Entretanto, pulsos excessivos ou drenagem deficiente podem formar zonas de solo permanentemente úmidas ao redor das raízes (Redekar *et al*., 2019). A microaspersão apresenta condição intermediária, pois aumenta a umidade próxima ao solo e pode molhar folhas inferiores, frutos e o colo das plantas. Nos sistemas por sulcos ou inundação, o escoamento superficial também pode transportar solo contaminado e propágulos entre diferentes pontos do cultivo (Belo *et al*., 2023).

Os benefícios fitossanitários da irrigação localizada foram demonstrados em cultivos de espinafre orgânico. Montazar *et al.* (2019) observaram menor incidência de míldio nos tratamentos irrigados por gotejamento após a emergência, em comparação com aqueles submetidos à aspersão. A redução esteve associada principalmente à menor duração do

molhamento foliar, condição essencial para a infecção e a esporulação do agente causal. Além do efeito sobre a doença, o sistema localizado favoreceu o uso mais eficiente da água e apresentou viabilidade para a produção comercial da cultura (Montazar *et al*., 2019). Nesse caso, a substituição do método de irrigação interferiu diretamente em uma etapa crítica do ciclo epidemiológico, demonstrando que o manejo da água pode atuar como medida complementar de controle.

Resultados semelhantes foram obtidos no cultivo da cebola. Wilson *et al.* (2024) verificaram menor incidência e severidade de doença bacteriana nas parcelas irrigadas por gotejamento. Em contraste, a aspersão prolongou o molhamento do dossel e criou condições favoráveis à disseminação por respingos e ao desenvolvimento da bacteriose. Essas evidências não indicam que o gotejamento seja universalmente superior, mas demonstram sua importância quando a água livre sobre a parte aérea constitui requisito para a infecção. Em espinafre e cebola, por exemplo, a irrigação localizada limitou o contato da água com os tecidos suscetíveis e reduziu a favorabilidade do ambiente (Montazar *et al*., 2019; Wilson *et al*., 2024). Assim, a escolha do sistema deve partir do conhecimento do ciclo da doença e da identificação da etapa epidemiológica que se pretende interromper.

Para patógenos radiculares, o desempenho sanitário do gotejamento depende da extensão e da permanência do bulbo molhado. Em solos pouco permeáveis, irrigações prolongadas ou frequentes podem reduzir a aeração, prejudicar as raízes e favorecer organismos adaptados à elevada umidade (Redekar *et al*., 2019). A distribuição da água também pode alterar a mobilidade de propágulos no solo e, quando a fonte hídrica está contaminada, conduzir o inóculo diretamente à rizosfera, favorecendo sua introdução e dispersão na área cultivada (Pérez-Rodríguez *et al*., 2016; Rushford *et al*., 2022). Assim, o manejo deve considerar as características do solo, a drenagem, o sistema radicular, a qualidade da água e a distribuição do patógeno.

A avaliação fitossanitária também deve considerar as condições econômicas e operacionais da propriedade. Sistemas localizados, quando bem dimensionados e manejados, podem economizar água, reduzir o molhamento da parte aérea e permitir maior controle da zona umedecida (Belo *et al*., 2023). Entretanto, falhas como vazamentos, entupimentos, pressão inadequada e irrigação excessiva podem aumentar a heterogeneidade hídrica e favorecer patógenos radiculares, sobretudo quando a rizosfera permanece saturada (Redekar *et al*., 2019). Portanto, a adequação do método depende da cultura, do solo, do patógeno, da qualidade da água e da capacidade de manejo do produtor.

Tabela 1. Métodos de irrigação, riscos epidemiológicos e medidas de manejo.

Método	Alteração ambiental e risco	Evidência científica	Medidas de manejo
Aspersão	Molha a parte aérea, prolonga a umidade e dispersa o inóculo pelo impacto das gotas.	O impacto das gotas pode suspender e dispersar esporos (Kim *et al*., 2019). A aspersão também favoreceu maior bacteriose da cebola em comparação com o gotejamento (Wilson *et al*., 2024).	Ajustar horário e duração; evitar prolongar o molhamento causado por chuva ou orvalho; melhorar a uniformidade e a ventilação.
Gotejamento	Mantém a parte aérea seca, mas pode causar saturação localizada e conduzir inóculo à rizosfera.	O método reduziu o míldio do espinafre (Montazar *et al*., 2019) e a bacteriose da cebola (Wilson *et al*., 2024).	Monitorar o bulbo molhado, ajustar os pulsos, garantir drenagem e avaliar a qualidade da água.
Microaspersão	Eleva a umidade próxima ao solo e pode molhar o colo, folhas inferiores e frutos.	O risco depende do alcance das gotas e da duração do molhamento nos tecidos suscetíveis (Huber; Gillespie, 1992; Agrios, 2005).	Regular pressão, raio, altura e posição dos emissores, evitando atingir órgãos suscetíveis.
Sulcos ou inundação	Promove escoamento superficial, encharcamento e transporte de solo contaminado.	Estruturas viáveis de *Verticillium dahliae* podem ser transportadas pela água de rios e redes de irrigação (Baroudy *et al*., 2018).	Controlar o fluxo, impedir o retorno de água contaminada, nivelar a área e favorecer a drenagem.
Recirculação	Reutiliza a água e pode acumular e redistribuir continuamente os patógenos.	Oomicetos dos gêneros *Phytophthora*, *Pythium* e *Phytopythium* foram mais abundantes na água recirculada de viveiro (Redekar *et al*., 2019).	Monitorar, filtrar e desinfetar a água; evitar a mistura entre lotes com condições sanitárias distintas.

Fonte: Elaborada pelos autores com base na literatura citada (2026).

3.4 A água de irrigação como reservatório e corredor de inóculo

A avaliação da água de irrigação costuma priorizar atributos como salinidade, sodicidade, turbidez e risco de entupimento dos emissores. Entretanto, sua qualidade fitossanitária também deve ser considerada, principalmente quando o abastecimento provém de rios, canais, açudes, reservatórios ou sistemas de recirculação. Essas fontes podem transportar estruturas de sobrevivência, esporos, zoósporos e outros propágulos capazes de introduzir patógenos em áreas cultivadas (Redekar *et al*., 2019). A detecção de um microrganismo na água, porém, não comprova a ocorrência da doença, pois o propágulo precisa permanecer viável, atingir o hospedeiro em quantidade suficiente e encontrar condições favoráveis à infecção. Ainda assim, fontes contaminadas podem aumentar a pressão de inóculo e abastecer continuamente a área com agentes potencialmente patogênicos (Calderon *et al*., 2023).

Os oomicetos merecem atenção devido à produção de zoósporos móveis e à associação com ambientes aquáticos. Em viveiro comercial, Redekar *et al.* (2019) identificaram elevada diversidade de *Phytophthora*, *Pythium* e *Phytopythium* em sistemas de recirculação, com maior abundância na água reciclada, indicando acúmulo e redistribuição do inóculo. Embora a cloração possa reduzir a viabilidade dos propágulos, sua eficiência depende da concentração, do tempo de contato e das características da água. Assim, reservatórios, canais, tubulações e estruturas de retorno devem ser considerados componentes interligados de uma mesma unidade epidemiológica (Redekar *et al*., 2019).

Em pomares de abacateiro nas Ilhas Canárias, Rodríguez-Padrón *et al.* (2019) também recuperaram espécies de *Phytophthora* e *Phytopythium* em água, substratos e plantas provenientes de viveiros e reservatórios. A ocorrência de espécies comuns aos viveiros e pomares sugeriu a participação da água e das mudas na dispersão dos patógenos. Após melhorias sanitárias nos viveiros, observou-se menor incidência nas avaliações posteriores, reforçando a importância da vigilância preventiva em ambientes com circulação contínua de água e material propagativo (Rodríguez-Padrón *et al*., 2019).

A água pode transportar estruturas resistentes de fungos habitantes do solo. Baroudy *et al.* (2018) detectaram microescleródios viáveis de *Verticillium dahliae* em rios, canais e resíduos retidos em filtros de irrigação de pomares comerciais. Esse achado demonstra que os filtros, além de evitarem entupimentos, podem atuar como pontos de monitoramento da carga biológica transportada pela água. Sua inspeção e a análise dos resíduos acumulados podem auxiliar na identificação precoce de patógenos e orientar medidas de tratamento e higienização do sistema (Baroudy *et al*., 2018).

Figura 3. Rede de irrigação como corredor epidemiológico, destacando os pontos potenciais de entrada, sobrevivência, acúmulo, detecção, tratamento e redistribuição de propágulos fitopatogênicos entre a fonte hídrica e a área cultivada.



Fonte: Elaborada pelos autores com auxílio da inteligência artificial generativa ChatGPT, da OpenAI, com base em Baroudy *et al.* (2018), Redekar *et al.* (2019), Rodríguez-Padrón *et al.* (2019), Rushford *et al.* (2022) e Calderon *et al.* (2023).

Ferramentas moleculares também ampliaram a detecção de microrganismos presentes em baixas concentrações. Calderon *et al.* (2023), utilizando sequenciamento da região ITS2, identificaram táxons fúngicos potencialmente fitopatogênicos em água do Rio Grande, com diferenças na composição entre o reservatório e a válvula de irrigação. Contudo, a detecção de DNA não comprova, isoladamente, a viabilidade ou infectividade dos organismos, sendo recomendada sua associação a métodos de cultivo, testes de patogenicidade ou outras técnicas confirmatórias (Calderon *et al*., 2023).

A vigilância fitossanitária deve abranger toda a rede de irrigação e considerar variações temporais. Rushford *et al.* (2022) detectaram diferentes espécies de *Pythium* em fontes e componentes de sistemas de irrigação, com variação conforme o ponto e o método de amostragem. Assim, o monitoramento deve incluir captação, reservatórios, filtros, tubulações e emissores, combinando técnicas de cultivo, iscas biológicas e métodos moleculares (Rushford *et al*., 2022). Avaliações periódicas reduzem o risco de subestimação dos patógenos e permitem a adoção de medidas corretivas antes de sua disseminação pela área irrigada.

3.5 Decisões de manejo que podem interromper epidemias

O manejo sanitário da irrigação deve começar pela identificação da etapa do ciclo da doença que pode ser modificada. Quando o fator crítico é o molhamento foliar, as medidas devem reduzir o contato da água com os tecidos e acelerar a secagem. Para patógenos radiculares, o foco recai sobre saturação, aeração, drenagem e frequência de aplicação. Se a água constitui a fonte de inóculo, monitoramento, filtração, tratamento e separação de setores tornam-se prioritários. Essa lógica evita recomendações baseadas apenas na preferência por determinado equipamento e direciona a intervenção ao mecanismo epidemiológico predominante (Agrios, 2005; Redekar *et al*., 2019; Belo *et al*., 2023).

A frequência das aplicações determina a alternância entre umedecimento e secagem e pode modificar a intensidade das doenças. Gao *et al.* (2018), em experimento de campo com *Apocynum venetum*, verificaram que intervalos de sete, nove e onze dias reduziram o índice máximo de ferrugem e a área abaixo da curva de progresso da doença em comparação com irrigações a cada três dias. Em oliveiras suscetíveis da cultivar 'Picual', Pérez-Rodríguez *et al.* (2016) observaram que irrigações curtas e frequentes favoreceram o desenvolvimento da murcha de *Verticillium*. Esses estudos convergem quanto à influência do regime hídrico, embora os intervalos adequados não possam ser transferidos diretamente entre culturas, solos e patógenos.

O momento de encerramento da irrigação também pode interferir nas doenças próximas à colheita. Belo *et al.* (2023) verificaram que suspender a aspersão aproximadamente duas semanas mais cedo, quando somente 5–10% das plantas de cebola apresentavam tombamento das folhas, reduziu as perdas por podridão bacteriana em comparação com a manutenção da irrigação até 90% de tombamento. A antecipação não reduziu a produtividade comercial nem alterou a distribuição do tamanho dos bulbos nas condições avaliadas. Em contrapartida, duplicar a frequência com eventos mais curtos não aumentou a doença, mostrando que o efeito do calendário depende do estádio fenológico e da forma como a água modifica os tecidos suscetíveis.

A manutenção hidráulica integra o manejo epidemiológico. Baixa uniformidade cria simultaneamente zonas excessivamente úmidas e pontos de déficit, aumentando a variabilidade fisiológica e sanitária do cultivo. Vazamentos, emissores desalinhados e alterações de pressão podem molhar partes da planta que deveriam permanecer secas. A inspeção de filtros, linhas laterais, conexões e dispositivos de drenagem deve ser acompanhada por registros de vazão, pressão e ocorrência de sintomas. Dessa maneira, falhas hidráulicas podem ser relacionadas

espacialmente aos focos da doença e corrigidas antes que contribuam para novos ciclos de infecção.

Nenhum ajuste hídrico substitui as demais medidas de controle. Cultivares resistentes, material propagativo sadio, rotação de culturas, eliminação de resíduos, nutrição equilibrada, controle biológico e uso criterioso de produtos fitossanitários permanecem indispensáveis. A contribuição da irrigação consiste em reduzir a favorabilidade ambiental, limitar a entrada ou o deslocamento do inóculo e diminuir a taxa de progresso da epidemia. Quando integrada às demais táticas, essa redução pode aumentar a eficiência do manejo e diminuir a dependência de intervenções curativas (Agrios, 2005; González-Domínguez *et al*., 2023; Hossain *et al*., 2024).

Tabela 2. Pontos críticos para integrar irrigação e manejo de doenças.

Ponto crítico	Indicadores	Evidência científica	Ajuste recomendado e efeito esperado
Molhamento foliar prolongado	Chuva, umidade do dossel, temperatura e tempo de secagem	Temperatura e duração do molhamento determinam o risco de infecção (Huber; Gillespie, 1992), enquanto o método de medição influencia sua estimativa (Rowlandson *et al*., 2015).	Ajustar o horário ou reduzir a duração da aplicação, diminuindo as condições para germinação e infecção.
Molhamento de órgãos suscetíveis	Alcance do jato e deposição em folhas, flores e frutos	O gotejamento reduziu o míldio do espinafre (Montazar *et al*., 2019) e a bacteriose da cebola (Wilson *et al*., 2024) em comparação com a aspersão.	Reposicionar emissores ou adotar irrigação localizada, reduzindo água livre e dispersão por respingos.
Excesso de umidade no solo	Umidade, drenagem, frequência dos pulsos e condição radicular	Irrigações curtas e frequentes favoreceram a murcha de *Verticillium* em oliveiras 'Picual' (Pérez-Rodríguez *et al*., 2016).	Aumentar o intervalo entre aplicações e corrigir a drenagem, favorecendo a aeração do solo.
Água contaminada	Origem da água, turbidez, análises microbiológicas e resíduos dos filtros	Propágulos de oomicetos e fungos foram detectados em fontes, reservatórios e filtros de irrigação (Baroudy *et al*., 2018; Redekar *et al*., 2019; Calderon *et al*., 2023).	Filtrar, desinfetar ou substituir a fonte, reduzindo a introdução e a redistribuição do inóculo.

Irrigação em fase sensível	Estádio da cultura, previsão meteorológica e histórico da doença	A antecipação da última aspersão reduziu podridões bacterianas da cebola sem comprometer a produção comercial (Belo *et al*., 2023).	Reprogramar ou encerrar a irrigação quando houver segurança agronômica, reduzindo a exposição dos tecidos.
Baixa uniformidade	Pressão, vazão, vazamentos e distribuição da umidade	A heterogeneidade da aplicação produz zonas de excesso e déficit hídrico, dificultando o manejo de doenças (Agrios, 2005; González-Domínguez *et al*., 2023).	Realizar manutenção e redimensionar os setores, reduzindo áreas saturadas e plantas sob estresse.

Fonte: Elaborada pelos autores com base na literatura citada (2026).

3.6 Irrigação de precisão, previsão de risco e manejo adaptativo

A irrigação de precisão amplia a possibilidade de conciliar a demanda hídrica das culturas com a redução do risco fitossanitário. Em vez de aplicar água segundo calendários fixos, o manejo pode combinar umidade ou tensão da água no solo, evapotranspiração, estádio fenológico, previsão de chuva e capacidade de armazenamento do solo. Quando a duração do molhamento foliar e modelos epidemiológicos são incorporados, a decisão deixa de responder apenas a quanto irrigar e passa a considerar quando e como aplicar água com menor probabilidade de favorecer a infecção (Huber; Gillespie, 1992; González-Domínguez *et al*., 2023).

Sensores instalados no solo auxiliam na prevenção do déficit e da saturação, mas precisam representar a profundidade explorada pelas raízes e a geometria do volume molhado. Em sistemas localizados, medições realizadas fora do bulbo podem indicar falsamente a necessidade de irrigar, enquanto sensores muito próximos ao emissor podem superestimar a disponibilidade de água. O número, a profundidade e a distribuição dos dispositivos devem considerar a variabilidade de solo, relevo e vazão. Os dados precisam ser avaliados juntamente com inspeções das raízes e do funcionamento do sistema.

No dossel, sensores de molhamento fornecem informações relevantes para modelos de risco, mas não reproduzem perfeitamente todas as superfícies vegetais. Rowlandson *et al.* (2015) destacaram que propriedades como rugosidade, orientação e capacidade de retenção modificam o período úmido. Sensores biomiméticos desenvolvidos por Yeon *et al.* (2023), produzidos a partir da replicação de superfícies foliares, apresentaram estimativas mais representativas do molhamento em espécies com características contrastantes. Esses avanços

demonstram que a precisão não depende somente da automação, mas da correspondência entre o sensor e o tecido que se pretende representar.

Modelos de previsão integram temperatura, umidade, chuva, molhamento e desenvolvimento do hospedeiro para identificar condições compatíveis com infecção. González-Domínguez *et al.* (2023) ressaltaram que os modelos evoluíram de regras empíricas simples para sistemas mecanísticos e dinâmicos, capazes de incorporar diferentes estádios do patógeno e da cultura. Aplicados à irrigação, esses sistemas podem indicar quando uma aspersão prolongaria uma janela de risco ou quando a chuva prevista torna a aplicação desnecessária. Sua utilidade, contudo, depende de validação regional, dados confiáveis e existência de uma decisão de manejo capaz de alterar o resultado.

A adoção enfrenta limitações relacionadas ao custo, à conectividade, à manutenção, à calibração e à capacitação dos usuários. Instrumentos simples, como tensiômetros, pluviômetros, inspeção do molhamento e registros conjuntos de irrigação e doença, podem gerar benefícios expressivos quando utilizados de forma consistente. O manejo adaptativo deve seguir um ciclo contínuo: observar o sistema, estimar o risco, executar uma decisão, registrar o resultado e ajustar a estratégia. Automatizar uma regra inadequada apenas aumenta a velocidade de repetição do erro; por isso, a sofisticação tecnológica deve ser acompanhada por conhecimento agronômico e fitopatológico.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A irrigação interfere diretamente na epidemiologia das doenças de plantas ao modificar o molhamento foliar, a umidade do solo, o microclima do dossel e a dispersão de inóculo. Seus efeitos dependem do método, da lâmina, da frequência e do horário de aplicação, bem como das características da cultura, do patógeno e do ambiente. Portanto, nenhum sistema de irrigação é universalmente favorável ou desfavorável à sanidade vegetal.

A qualidade da água e as condições da rede também devem ser monitoradas, pois fontes, reservatórios, filtros, tubulações e emissores podem favorecer o transporte e a distribuição de fitopatógenos. A integração de sensores, dados meteorológicos e modelos de previsão pode orientar aplicações mais eficientes e reduzir condições favoráveis à infecção.

Conclui-se que o manejo da irrigação deve fazer parte do manejo integrado de doenças. A escolha adequada do sistema, o ajuste das aplicações, o monitoramento da água e a manutenção da rede podem limitar a disseminação de patógenos e reduzir o progresso das epidemias, contribuindo para uma produção mais eficiente e sustentável.

REFERÊNCIAS

AGRIOS, G. N. Plant pathology. 5. ed. Burlington: Elsevier Academic Press, 2005.

ASSEFA, T. et al. Experimental evaluation of conservation agriculture with drip irrigation for water productivity in Sub-Saharan Africa. Water, v. 11, n. 3, art. 530, 2019. DOI: https://doi.org/10.3390/w11030530.

AUNG, K.; JIANG, Y.; HE, S. Y. The role of water in plant–microbe interactions. The Plant Journal, v. 93, n. 4, p. 771–780, 2018. DOI: https://doi.org/10.1111/tpj.13795.

BAROUDY, F. et al. Long-distance spread of Verticillium dahliae through rivers and irrigation systems. Plant Disease, v. 102, n. 8, p. 1559–1565, 2018. DOI: https://doi.org/10.1094/PDIS-08-17-1189-RE.

BEATTIE, G. A. Water relations in the interaction of foliar bacterial pathogens with plants. Annual Review of Phytopathology, v. 49, p. 533–555, 2011. DOI: https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-073009-114436.

BELO, T. R. et al. Reducing the risk of onion bacterial diseases through managing irrigation frequency and final irrigation timing. Agricultural Water Management, v. 288, art. 108476, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108476.

CALDERON, M.; YANG, C.; ANCONA, V. Assessing fungal plant pathogen presence in irrigation water from the Rio Grande River in South Texas, USA. Agriculture, v. 13, n. 7, art. 1401, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/agriculture13071401.

ÇETIN, Ö.; KARA, A. Assessment of water productivity using different drip irrigation systems for cotton. Agricultural Water Management, v. 223, art. 105693, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105693.

CHOROLQUE, A. et al. Incidence of bacterial diseases associated with irrigation methods on onions (Allium cepa). Journal of the Science of Food and Agriculture, v. 98, n. 14, p. 5534–5540, 2018. DOI: https://doi.org/10.1002/jsfa.9101.

EKANAYAKE, G.; GOHMANN, R.; MACKEY, D. A method for quantitation of apoplast hydration in Arabidopsis leaves reveals water-soaking activity of effectors of Pseudomonas syringae during biotrophy. Scientific Reports, v. 12, art. 18363, 2022. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-022-22472-x.

GAO, P. et al. The influence of irrigation frequency on the occurrence of rust disease (Melampsora apocyni) and determination of the optimum irrigation regime in organic Apocynum venetum production. Agricultural Water Management, v. 205, p. 81–89, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.04.026.

GENTZEL, I. et al. Dynamic nutrient acquisition from a hydrated apoplast supports biotrophic proliferation of a bacterial pathogen of maize. Cell Host & Microbe, v. 30, n. 4, p. 502–517.e4, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.chom.2022.03.017.

GONZÁLEZ-DOMÍNGUEZ, E. et al. A general model for the effect of crop management on plant disease epidemics at different scales of complexity. Agronomy, v. 10, n. 4, art. 462, 2020. DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy10040462.

GONZÁLEZ-DOMÍNGUEZ, E. et al. Plant disease models and forecasting: changes in principles and applications over the last 50 years. Phytopathology, v. 113, n. 4, p. 678–693, 2023. DOI: https://doi.org/10.1094/PHYTO-10-22-0362-KD.

GUNDIM, A. S. et al. Precision irrigation trends and perspectives: a review. Ciência Rural, v. 53, n. 8, e20220155, 2023. DOI: https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20220155.

HOSSAIN, M. M. et al. Plant disease dynamics in a changing climate: impacts, molecular mechanisms, and climate-informed strategies for sustainable management. Discover Agriculture, v. 2, art. 132, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s44279-024-00144-w.

HUBER, L.; GILLESPIE, T. J. Modeling leaf wetness in relation to plant disease epidemiology. Annual Review of Phytopathology, v. 30, p. 553–577, 1992. DOI: https://doi.org/10.1146/annurev.py.30.090192.003005.

JHA, A. K. et al. Impact of irrigation method on water use efficiency and productivity of fodder crops in Nepal. Climate, v. 4, n. 1, art. 4, 2016. DOI: https://doi.org/10.3390/cli4010004.

KIM, S.; PARK, H.; GRIGORIEV, R. O.; HONG, J. Vortex-induced dispersal of a plant pathogen by raindrop impact. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, v. 116, n. 11, p. 4917–4922, 2019. DOI: https://doi.org/10.1073/pnas.1820318116.

LAJEUNESSE, G. et al. Light prevents pathogen-induced aqueous microenvironments via potentiation of salicylic acid signaling. Nature Communications, v. 14, art. 713, 2023. DOI: https://doi.org/10.1038/s41467-023-36382-7.

MONTAZAR, A.; CAHN, M.; PUTMAN, A. Research advances in adopting drip irrigation for California organic spinach: preliminary findings. Agriculture, v. 9, n. 8, art. 177, 2019. DOI: https://doi.org/10.3390/agriculture9080177.

NGUYEN, B. H.; GILBERT, G. S.; ROLANDI, M. A bio-mimetic leaf wetness sensor from replica molding of leaves. Advanced Sensor Research, v. 2, art. 2200033, 2023. DOI: https://doi.org/10.1002/adsr.202200033.

NOMURA, K. et al. Bacterial pathogens deliver water- and solute-permeable channels to plant cells. Nature, v. 621, p. 586–591, 2023. DOI: https://doi.org/10.1038/s41586-023-06531-5.

PÉREZ-RODRÍGUEZ, M. et al. The effect of short irrigation frequencies on the development of Verticillium wilt in the susceptible olive cultivar 'Picual' under field conditions. Plant Disease, v. 100, n. 9, p. 1880–1888, 2016. DOI: https://doi.org/10.1094/PDIS-09-15-1018-RE.

REDEKAR, N. R.; EBERHART, J. L.; PARKE, J. L. Diversity of Phytophthora, Pythium, and Phytopythium species in recycled irrigation water in a container nursery. Phytobiomes Journal, v. 3, n. 1, p. 31–45, 2019. DOI: https://doi.org/10.1094/PBIOMES-10-18-0043-R.

RODRÍGUEZ-PADRÓN, C.; RODRÍGUEZ, A.; SIVERIO, F. Survey in nurseries and irrigation water reservoirs as sources of oomycetes found in avocado orchards in the Canary

Islands. Plant Disease, v. 103, n. 6, p. 1264–1274, 2019. DOI: https://doi.org/10.1094/PDIS-08-18-1412-RE.

ROWLANDSON, T. et al. Reconsidering leaf wetness duration determination for plant disease management. Plant Disease, v. 99, n. 3, p. 310–319, 2015. DOI: https://doi.org/10.1094/PDIS-05-14-0529-FE.

RUSHFORD, C. A.; NORTH, R. L.; MILLER, G. L. Detection of Pythium spp. in golf course irrigation systems. Plant Disease, v. 106, n. 1, p. 46–56, 2022. DOI: https://doi.org/10.1094/PDIS-02-21-0399-RE.

SWETT, C. L.; LOWE, A.; UYEDA, J. Managing crop diseases under water scarcity. Annual Review of Phytopathology, v. 58, p. 387–406, 2020. DOI: https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-030320-041421.

WILSON, R. G.; AEGERTER, B. J.; LAHUE, G. T. The influence of sprinkler and drip irrigation on the incidence and severity of bacterial disease in onions grown in northeast California. Plant Health Progress, v. 25, n. 3, p. 293–298, 2024. DOI: https://doi.org/10.1094/PHP-01-24-0002-RS.