

# Abordagens Modernas para Diagnóstico e Controle de Doenças em Culturas Hortícolas sob Condições de Mudanças Climáticas

Автор(и): гл. ас. д-р Катя Василева, ИЗК "Марица" - Пловдив

Дата: 25.03.2026 Брой: 3/2026



## Resumo

As mudanças climáticas estão alterando significativamente a dinâmica das doenças em culturas de hortaliças, levando a um desenvolvimento mais rápido dos patógenos, maior sobrevivência do inóculo e surtos epidêmicos mais frequentes. O aumento das temperaturas, chuvas extremas e períodos de seca criam condições que facilitam infecções por vírus, bactérias e fungos

patogênicos. Nessas condições, os métodos tradicionais de diagnóstico muitas vezes são insuficientes devido à sobreposição de sintomas e alterações induzidas por estresse. As abordagens modernas incluem testes imunocromatográficos rápidos, métodos moleculares, diagnóstico hiperespectral, tecnologias de drones e modelos preditivos. O manejo eficaz de doenças requer uma abordagem integrada envolvendo variedades resistentes, biofungicidas, bioestimulantes e práticas agronômicas otimizadas. A combinação de ferramentas de diagnóstico tradicionais e modernas, apoiada por avaliação fitopatológica especializada, é fundamental para a produção sustentável em condições de mudanças climáticas.

As doenças das plantas continuam sendo um dos desafios mais sérios para a agricultura moderna, causando perdas anuais significativas em produtividade, qualidade e resiliência do agroecossistema. Segundo Fang e Ramasamy (2015), as perdas causadas por patógenos "variam entre 20% e 40%" e representam um fator chave que ameaça a segurança alimentar global. Em condições de mudanças climáticas, sistemas de produção intensivos e fluxos comerciais globalizados, o risco de epidemias, surgimento de novas raças e disseminação de patógenos invasores aumenta significativamente (Juroszek & von Tiedemann, 2011).

O manejo eficaz de doenças requer duas direções inter-relacionadas: diagnóstico preciso e oportuno e estratégias de controle sustentáveis que integrem abordagens biológicas, agronômicas, químicas e digitais. Nas últimas décadas, o diagnóstico passou por uma profunda transformação – da avaliação visual e microscopia para métodos moleculares, plataformas de fenotipagem de alto rendimento, sensores remotos e algoritmos de aprendizado profundo. Como observado por Balodi et al. (2017), "a ciência do diagnóstico de doenças evoluiu da inspeção visual para técnicas sorológicas e moleculares altamente sensíveis", aumentando significativamente a precisão e a velocidade da detecção.

Paralelamente, o conceito de controle de doenças está mudando de soluções químicas unilaterais para um manejo integrado, ecologicamente e evolutivamente sólido. He et al. (2016) enfatizam que o manejo sustentável deve "criar condições favoráveis para o crescimento das plantas e desfavoráveis para a reprodução e evolução do patógeno", combinando Resistência, Evitação, Eliminação, Remediação (RAER). Novas tendências incluem biocontrole, extratos vegetais, abordagens genéticas, modelos preditivos e sistemas digitais de suporte à decisão (Mukhtar et al., 2023).

Nesse contexto, os avanços científicos contemporâneos em duas direções-chave são resumidos:

(1) diagnóstico de doenças de plantas, incluindo métodos clássicos, ópticos e baseados em IA;

(2) controle e manejo integrado, considerando abordagens ecológicas, biológicas, genéticas e tecnológicas.

Esse foco duplo permite traçar como os avanços no diagnóstico apoiam um manejo de doenças mais preciso, sustentável e adaptativo no contexto de agroecossistemas em mudança dinâmica.

O diagnóstico eficaz é a base de qualquer estratégia de manejo de doenças. Ele determina a decisão correta, minimiza perdas e permite a intervenção precoce para controle. Como enfatizado por Balodi et al., (2017), "a ciência do diagnóstico de doenças evoluiu da inspeção visual... para técnicas sorológicas e moleculares altamente sensíveis". As abordagens modernas podem ser agrupadas em três direções principais: métodos laboratoriais clássicos, tecnologias ópticas e remotas, e inteligência artificial.

Técnicas sorológicas como ELISA, imunofluorescência e testes imunocromatográficos rápidos permanecem amplamente utilizadas devido à sua especificidade e aplicabilidade em condições de campo. O ELISA é um dos métodos mais difundidos, onde "a mudança de cor visual permite uma detecção fácil" (Fang & Ramasamy, 2015). No entanto, a sensibilidade para patógenos bacterianos é limitada.

Métodos moleculares, especialmente PCR e suas variantes (nested, multiplex, tempo real), oferecem a maior precisão. Balodi et al., (2017) observam que as análises baseadas em PCR são "específicas, sensíveis, eficientes, rápidas e relativamente econômicas". A PCR em tempo real permite avaliação quantitativa e é particularmente valiosa para testes de sementes e patógenos de quarentena.

Plataformas de fenotipagem (fluorescência da clorofila, imagem hiperespectral e térmica) fornecem observação não destrutiva e repetida. Segundo Balodi et al., (2017) "esses métodos são não destrutivos... e permitem a visualização de reações localizadas". O diagnóstico hiperespectral é particularmente promissor para detecção precoce, pois captura mudanças fisiológicas antes que os sintomas visíveis apareçam.

Fang e Ramasamy (2015) enfatizam que as técnicas hiperespectrais "são amplamente usadas para identificar doenças por meio de mudanças na reflectância". Termografia e fluorescência complementam a análise, mas são sensíveis a condições externas e muitas vezes requerem combinação com outros métodos.

Nos últimos anos, o aprendizado profundo tornou-se uma ferramenta chave para o reconhecimento automático de doenças. Li et al., (2021) observam que "o aprendizado profundo evita as deficiências da seleção manual de características... e torna a extração de características mais objetiva". Arquiteturas CNN como AlexNet, GoogLeNet, ResNet e DenseNet alcançam acurácias acima de 95–99% em conjuntos de dados controlados. Saleem et al., (2019) mostram que o GoogLeNet supera o AlexNet no PlantVillage, e Demilie (2024) conclui que as CNNs "são frequentemente a escolha preferida... devido à sua capacidade de capturar hierarquias espaciais". No entanto, as condições reais de campo permanecem um desafio e exigem modelos mais complexos combinados com sensores remotos e sistemas preditivos.

As estratégias modernas de controle estão evoluindo de abordagens dominadas por produtos químicos para sistemas integrados, ecologicamente orientados e evolutivamente sustentáveis. O principal objetivo é reduzir a pressão do patógeno mantendo a produtividade e o equilíbrio ecológico.

As mudanças climáticas estão alterando a epidemiologia das doenças e exigem estratégias adaptativas. Juroszek e von Tiedemann (2011) observam que "medidas preventivas... podem se tornar particularmente importantes no futuro". Mukhtar et al., (2023) enfatizam que o MIPD (Manejo Integrado de Pragas e Doenças) é "o método mais adequado e relevante nas circunstâncias atuais". Novas tendências incluem: extratos vegetais – por exemplo, *Lantana camara*, cujos extratos "suprimem o crescimento de *Pyricularia oryzae* e *Xanthomonas* spp."; abordagens genéticas – expressão de reguladores como AtMYB12, que "aumenta os níveis de flavonoides e a resistência a vários patógenos"; resistência derivada do patógeno (PDR) – estratégias transgênicas contra vírus.

Sistemas de diagnóstico e baseados em IA apoiam o manejo por meio de: detecção e localização precoce de surtos; redução de tratamentos desnecessários; integração com modelos preditivos; monitoramento da eficácia e da resistência.

Como observado por Demilie (2024), Aprendizado de Máquina e Aprendizado Profundo "melhoram o desempenho e a velocidade de detecção e classificação", tornando-os um componente chave dos sistemas modernos de MIP.

A sinergia entre o diagnóstico moderno e o manejo integrado cria novas oportunidades para uma agricultura precisa, eficaz e ecologicamente sustentável. Essa combinação permite não apenas a redução de perdas, mas também a construção de agroecossistemas mais resilientes capazes de responder aos desafios futuros.

## **Materiais e Métodos**

Os principais patógenos que afetam as culturas de hortaliças são vírus (TSWV, ToMV, PMMoV, PVY), bactérias (*Xanthomonas*, *Pseudomonas*, *Clavibacter*) e fungos patogênicos como *Phytophthora*, *Fusarium*, *Verticillium*, *Alternaria* e *Botrytis* (Figura 1).



*Figura 1. Sintomas de requeima da batata, murcha de verticillium em pimentão, manchas bacterianas em pimentão, cancro bacteriano em tomate*

As mudanças climáticas levam a "aumento das temperaturas → desenvolvimento mais rápido do patógeno" e "estações de crescimento mais longas → mais ciclos de infecção". Para fins de

diagnóstico, foram utilizados métodos tradicionais e modernos. A avaliação inicial foi o diagnóstico visual, que é rápido, mas subjetivo, pois "os sintomas podem se sobrepor entre diferentes patógenos ou fatores abióticos". A microscopia foi aplicada para observar estruturas morfológicas, com coloração específica usada em alguns casos. Meios de cultivo foram usados para isolar bactérias e fungos, enquanto os vírus foram diagnosticados usando testes imunocromatográficos.

Os testes imunocromatográficos rápidos utilizados foram: AgriStrip® (BIOREBA), Pocket Diagnostic® e LOEWE®FAST, que permitem a detecção de vírus, bactérias e alguns fungos patogênicos em 5-10 minutos e são "adequados para campo e laboratório" (Figura 2).



*Figura 2. Testes imunocromatográficos rápidos: AgriStrip® (BIOREBA), Pocket Diagnostic® e LOEWE®FAST*

Para confirmação dos resultados, são recomendados métodos moleculares (PCR, qPCR, LAMP), distinguidos por "sensibilidade muito alta" e "alta especificidade", mas que requerem um laboratório especializado. Métodos hiperespectrais para detecção precoce de infecções e avaliação de estresse fisiológico são amplamente utilizados, com a tecnologia definida como "não invasiva, rápida e escalável". Drones com sensores RGB, multiespectrais, hiperespectrais e térmicos foram usados para monitoramento de campo, mapeamento de doenças e avaliação de biomassa. Modelos preditivos baseados em temperatura, umidade, precipitação e microclima

foram usados para prever o risco de infecção e otimizar o momento do tratamento. São amplamente utilizados na produção de hortaliças biofungicidas (por exemplo, *Bacillus subtilis*, *Trichoderma harzianum*, *Pythium oligandrum*), bioestimulantes (aminoácidos, algas, ácidos húmicos) e fungicidas químicos (produtos à base de cobre, Mancozebe, Azoxistrobina, Difenconazol, etc.).

## Resultados

A influência das mudanças climáticas na dinâmica dos patógenos e na frequência de doenças em culturas de hortaliças é claramente expressa. O aumento das temperaturas acelera o desenvolvimento de múltiplos patógenos, e invernos mais quentes aumentam a sobrevivência do inóculo. Chuvas extremas criam condições favoráveis para o desenvolvimento de doenças fúngicas e bacterianas, pois "alta umidade > 90% acelera a esporulação", e gotas de chuva facilitam a disseminação de bactérias a longa distância. A seca leva ao estresse fisiológico e a micro-fissuras em folhas e raízes, o que facilita a penetração do patógeno – "o estresse seco causa micro-fissuras... pontos de entrada para bactérias". Para *Verticillium dahliae*, verificou-se que os microescleródios são mais facilmente ativados após a irrigação seguindo um período seco, aumentando o risco de infecção.

Os métodos de diagnóstico mostram eficácia variável dependendo das condições e dos objetivos da análise. Testes imunocromatográficos rápidos demonstram alta especificidade e são particularmente úteis para verificações em