

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

VICTOR CASSIANO BARBOZA SILVA

DOENÇAS DE PLANTAS E O USO DE SISTEMAS DE PREVISÃO E AVISOS NO
MANEJO

UBERLÂNDIA-MG

2025

VICTOR CASSIANO BARBOZA SILVA

DOENÇAS DE PLANTAS E O USO DE SISTEMAS DE PREVISÃO E AVISOS NO
MANEJO

Trabalho de Conclusão apresentado ao curso de Pós-Graduação Lato Sensu em Fitossanidade, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Fitossanidade.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Araujo

UBERLÂNDIA-MG

2025

AGRADECIMENTOS

A conclusão deste trabalho representa não apenas o encerramento de uma etapa acadêmica, mas também o resultado de uma jornada repleta de aprendizados, desafios e conquistas.

Agradeço primeiramente a Deus, pela força, sabedoria e saúde concedidas ao longo dessa caminhada.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Leonardo Araujo, pela orientação precisa, apoio e paciência, que foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores e colegas do curso, pelas trocas de conhecimento, experiências e pelo apoio mútuo que enriqueceram minha formação.

À minha família, em especial aos meus pais e à minha esposa, pelo amor incondicional, compreensão e suporte em todos os momentos.

Aos amigos que estiveram presentes nos momentos difíceis e celebraram comigo cada conquista.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho. A cada um, minha sincera gratidão.

RESUMO

As doenças de plantas representam um dos principais desafios para a agricultura, podendo comprometer significativamente a produtividade das culturas. Essas doenças estão diretamente relacionadas a variáveis climáticas, como temperatura, umidade relativa e molhamento foliar, que influenciam o ciclo de vida dos patógenos e a severidade das epidemias. Com os avanços tecnológicos, sistemas de previsão e avisos fitossanitários têm sido usados como ferramentas de apoio à tomada de decisão no manejo fitossanitário, permitindo maior eficiência no uso de fungicidas e redução de impactos ambientais. Este trabalho, por meio de uma revisão bibliográfica, teve como objetivo analisar a influência das variáveis climáticas no desenvolvimento de doenças fúngicas em diferentes culturas agrícolas e avaliar a aplicabilidade dos sistemas de previsão e avisos. Foram abordados os fundamentos teóricos desses sistemas, sua classificação, aplicações práticas em culturas como batata, maçã e café, além dos desafios enfrentados para sua implementação, como barreiras de adoção pelos produtores, escassez de mão de obra qualificada e limitações tecnológicas. Conclui-se que, embora os sistemas de previsão apresentem grande potencial para tornar o manejo fitossanitário mais sustentável e eficiente, sua adoção ainda depende de investimentos em capacitação, infraestrutura e políticas públicas que incentivem a inovação no campo.

Palavras-chave: Manejo fitossanitário. Modelos Preditivos. Variáveis climáticas.

ABSTRACT

Plant diseases represent one of the main challenges for agriculture, and can significantly compromise crop productivity. These diseases are directly related to climatic variables, such as temperature, relative humidity, and leaf wetness, which influence the life cycle of pathogens and the severity of epidemics. With technological advances, forecasting systems and phytosanitary warnings have been used as tools to support decision-making in phytosanitary management, allowing greater efficiency in the use of fungicides and reduction of environmental impacts. This work, through a literature review, aimed to analyze the influence of climatic variables on the development of fungal diseases in different agricultural crops and to evaluate the applicability of forecasting and warning systems. The theoretical foundations of these systems, their classification, practical applications in crops such as potatoes, apples, and coffee, as well as the challenges faced for their implementation, such as barriers to adoption by producers, shortage of qualified labor, and technological limitations, were addressed. It is concluded that, although forecasting systems have great potential to make phytosanitary management more sustainable and efficient, their adoption still depends on investments in training, infrastructure, and public policies that encourage innovation in the field.

Keywords: Phytosanitary management. Predictive models. Climatic variables.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - INFLUÊNCIA CLIMÁTICA E AS FASES DO CICLO DAS DOENÇAS..... 12

Tabela 2 - CLASSES DE TEMPERATURA MÉDIA DO AR, DURANTE OS PERÍODOS CONTINUOS DE ACÚMULO DE HORAS COM UMIDADE RELATIVA DO AR MAIOR DO QUE 90% ($HUR > 90$) E RESPECTIVOS VALORES DE SEVERIDADE (VS) DIÁRIOS PARA O CONTROLE DE REQUEIMA..... 19

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
1.1 JUSTIFICATIVA	9
1.2 OBJETIVOS	9
1.2.1 Objetivo geral	9
1.2.2 Objetivos específicos.....	10
2 METODOLOGIA	10
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	11
3.1 HISTÓRICO DAS DOENÇAS EM PLANTAS CULTIVADAS	11
3.2 FATORES CLIMÁTICOS E SEU PAPEL NO DESENVOLVIMENTO DAS DOENÇAS FÚNGICAS	12
3.2.1 Como atua cada fator no desenvolvimento da doença	13
3.2.1.1 Temperatura	14
3.2.1.2 Umidade Relativa	14
3.2.1.3 Molhamento Foliar	15
3.3 SISTEMAS DE PREVISÃO E AVISOS	15
3.3.1 Classificação de Modelos de Previsão	16
3.3.2 Aplicações práticas de Sistemas de Previsão de Doenças	18
3.3.2.1 Requeima da Batata (<i>Phytophthora infestans</i>)	18
3.3.2.2 Doenças da Macieira	20
3.3.2.3 Ferrugem do cafeeiro	21
3.3.2.4 Agroconnect	23
3.3.2.5 xarvio® Digital Farming Solutions.....	25
3.3.2.6 Sistema de Previsão da Podridão Floral dos Citros.....	25
3.4 DESAFIOS E LIMITAÇÕES NA IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMAS DE PREVISÃO	26
3.4.1 Barreiras de Adoção pelos Produtores.....	27
3.4.2 Mão de obra qualificada	27
3.4.3 Infraestrutura Tecnológica e Custos.....	27
4 CONCLUSÃO	28
REFERÊNCIAS.....	30

1 INTRODUÇÃO

As doenças de plantas representam um dos maiores desafios para a agricultura mundial, causando perdas significativas na produtividade e qualidade das culturas. Esses impactos econômicos afetam desde pequenos produtores até cadeias globais de fornecimento de alimentos, evidenciando a importância do manejo adequado dessas doenças para a segurança alimentar (STRANGE; SCOTT, 2005). Registros históricos indicam que a existência de doenças em plantas já era observada na antiguidade. Teofrasto (372–287 a.C.), considerado um dos primeiros naturalistas, documentou anomalias em plantas cultivadas, como trigo e leguminosas, ainda que sem compreender suas causas ou agentes causadores (AGRIOS, 2005). Até o século XIX, as doenças de plantas eram frequentemente atribuídas a fenômenos sobrenaturais ou desequilíbrios ambientais, até que avanços na microbiologia, liderados por cientistas como Anton de Bary, estabeleceram a relação causal entre fungos e doenças, como no caso da requeima da batata (*Phytophthora infestans*), responsável pela grande fome irlandesa (1845–1852) (NOWICKI et al., 2012).

O desenvolvimento de doenças fúngicas em plantas é fortemente influenciado por variáveis climáticas, como temperatura, umidade relativa e molhamento foliar. Esses fatores ambientais modulam o ciclo de vida dos patógenos e influenciam diretamente a severidade das epidemias (VALE; ZAMBOLIM, 1996). Com a consolidação da fitopatologia como ciência, as estratégias de controle evoluíram para abordagens integradas que combinam o uso de fungicidas com diferentes mecanismos de ação, o desenvolvimento de cultivares resistentes, práticas culturais adequadas e o controle biológico, compondo o manejo integrado de doenças (MID) (FRAC-BR, 2025). Contudo, o uso indiscriminado de agroquímicos tem gerado preocupações ambientais e econômicas, além de contribuir para o surgimento de resistência a defensivos agrícolas em patógenos, o que demanda soluções mais sustentáveis.

Nesse contexto, os sistemas de previsão e avisos surgiram como ferramentas inovadoras para otimizar o manejo fitossanitário. Desde os primeiros modelos, como BLITECAST, desenvolvido na década de 1980, até os avanços recentes com o uso de geoprocessamento, sensoriamento remoto e inteligência

artificial, essas tecnologias permitem prever a ocorrência de doenças com base em dados meteorológicos e modelos epidemiológicos, reduzindo a aplicação de fungicidas e minimizando impactos ambientais (FERNANDES et al., 2019).

Apesar dos avanços, a implementação desses sistemas enfrenta desafios, como a falta de infraestrutura, escassez de mão de obra qualificada e a resistência de produtores em adotar novas tecnologias. Assim, este trabalho tem como objetivo geral analisar a influência das variáveis climáticas no desenvolvimento de doenças fúngicas em culturas agrícolas, revisar sistemas de previsão e aviso no manejo fitossanitário e discutir os desafios para sua implementação.

1.1 JUSTIFICATIVA

As doenças fúngicas representam um dos principais desafios para a agricultura, podendo causar grandes prejuízos econômicos e reduzir a produtividade das culturas. O desenvolvimento dessas doenças está diretamente ligado a variáveis climáticas, como temperatura, umidade e molhamento foliar, que influenciam o ciclo de vida dos patógenos e a severidade das epidemias.

Com os avanços tecnológicos, sistemas de previsão e avisos têm sido desenvolvidos para auxiliar os produtores na tomada de decisão, otimizando o uso de fungicidas e reduzindo impactos ambientais e econômicos. No entanto, a eficiência desses sistemas varia conforme a cultura, a região e as condições climáticas específicas. Assim, compreender como as variáveis climáticas influenciam o desenvolvimento das doenças fúngicas e avaliar a aplicabilidade desses sistemas são aspectos fundamentais para aprimorar o manejo fitossanitário e garantir maior sustentabilidade na produção agrícola.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Analisar a influência das variáveis climáticas no desenvolvimento de doenças fúngicas em diferentes culturas agrícolas e avaliar a aplicação de sistemas de previsão e aviso no manejo fitossanitário.

1.2.2 Objetivos específicos

Identificar as principais variáveis climáticas que influenciam o desenvolvimento de doenças fúngicas nas culturas agrícolas.

Revisar modelos e sistemas de previsão e aviso utilizados no manejo de doenças de plantas.

Analisar a aplicabilidade desses sistemas para a tomada de decisão no manejo fitossanitário.

Discutir os desafios e limitações na implementação dessas ferramentas para o manejo sustentável de doenças.

2 METODOLOGIA

O trabalho foi conduzido por meio de uma revisão bibliográfica, com o objetivo de reunir e analisar informações disponíveis na literatura sobre a relação entre variáveis climáticas e o desenvolvimento de doenças de plantas, bem como a aplicação de sistemas de previsão e aviso no manejo fitossanitário.

A busca por materiais foi realizada em bases e plataformas eletrônicas de acesso aberto, como Google Acadêmico, SciELO, CAPES Periódicos etc., além de livros e documentos institucionais. A seleção das fontes foi orientada pela pertinência temática e relevância científica, considerando a contribuição de cada material para a compreensão do objeto de estudo.

Foram incluídos documentos disponíveis na íntegra, com data de publicação preferencialmente entre os anos de 1951 e 2025, redigidos em português e inglês, e que abordassem de forma direta ou complementar os aspectos centrais do objeto de estudo.

A análise dos textos selecionados foi conduzida de forma descritiva e interpretativa, buscando identificar convergências, divergências e lacunas na literatura, além de contribuir para uma melhor compreensão e fundamentação teórica sobre o tema proposto.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 HISTÓRICO DAS DOENÇAS EM PLANTAS CULTIVADAS

O estudo das doenças de plantas remonta à antiguidade, com registros de anomalias em culturas agrícolas datando de séculos antes de Cristo. Teofrasto (372–287 a.C.), considerado o precursor da botânica, descreveu sintomas de doenças em culturas como trigo e legumes, embora sem identificar suas causas biológicas. Durante grande parte da história, as doenças de plantas foram interpretadas como punições divinas ou fenômenos sobrenaturais, conforme evidenciado em textos religiosos e registros históricos (MICHEREFF, 2001). Essa visão mística predominou até o século XIX, quando avanços na microbiologia e o desenvolvimento do microscópio permitiram a identificação de microrganismos como agentes causais.

Um marco fundamental na história da fitopatologia foi a comprovação, por Anton de Bary, de que a requeima da batata (*P. infestans*) era causada por um organismo patogênico, estabelecendo as bases da teoria etiológica das doenças de plantas (AGRIOS, 2005). Essa descoberta foi crucial, pois a epidemia da requeima foi responsável pela grande fome irlandesa (1845–1852), um dos eventos mais devastadores da história agrícola, que provocou cerca de um milhão de mortes e intensos fluxos migratórios (NOWICKI et al., 2012).

Doenças fúngicas em plantas representam uma ameaça significativa à segurança alimentar global, causando perdas econômicas substanciais na agricultura. Patógenos fúngicos, como os que causam ferrugens, míldios e podridões, podem reduzir a produtividade de culturas em até 40%, resultando em prejuízos anuais estimados em centenas de bilhões de dólares globalmente (NIZAMANI et al., 2024). Essas doenças afetam diversos órgãos das plantas, incluindo folhas, caules, frutos e raízes, causando sintomas como desfolha, podridões, murchas e, em casos extremos, a morte da planta (TÖFOLI; DOMINGUES, 2018).

Culturas essenciais, como trigo, milho, soja, arroz e batata, são particularmente vulneráveis. Estima-se que as perdas causadas por fungos nessas culturas poderiam, se evitadas, fornecer calorias suficientes para alimentar entre 600

milhões e 4 bilhões de pessoas por um ano (STUKENBROCK; GURR, 2023). No trigo, por exemplo, as perdas globais variam de 24,3 a 62 milhões de toneladas métricas anualmente, com impactos econômicos entre US\$ 4,2 bilhões e US\$ 10,8 bilhões (SAVARY et al., 2019). No Brasil, a ferrugem asiática da soja (*Phakopsora pachyrhizi*), introduzida em 2001, é uma das principais doenças, com potencial de reduzir a produtividade em até 80% e custos diretos e indiretos superiores a US\$ 2 bilhões por safra (GOTTEMS, 2021). Outro exemplo marcante é a vassoura-de-bruxa (*Moniliophthora perniciosa*), que devastou a produção de cacau na Bahia a partir de 1989, reduzindo a produção nacional de aproximadamente 400 mil toneladas em 1986 para cerca de 118 mil toneladas em 1992, transformando o Brasil de exportador para importador de cacau (MEINHARDT et al., 2008).

Com a consolidação da fitopatologia como ciência no século XIX, o conhecimento sobre fungos fitopatogênicos avançou significativamente. A descrição detalhada de sua taxonomia, morfologia e ciclos de infecção permitiu o desenvolvimento de estratégias de controle mais eficazes (MICHEREFF, 2001)

3.2 FATORES CLIMÁTICOS E SEU PAPEL NO DESENVOLVIMENTO DAS DOENÇAS FÚNGICAS

As doenças em plantas cultivadas são moduladas por fatores climáticos que influenciam diretamente o ciclo de vida dos patógenos, desde a germinação de esporos até a infecção e dispersão. Variáveis como temperatura, umidade relativa e molhamento foliar são determinantes na epidemiologia dessas doenças, atuando nas diferentes fases do ciclo das doenças (Tabela 1) (AGRIOS, 2005).

Tabela 1 - INFLUÊNCIA CLIMÁTICA E AS FASES DO CICLO DAS DOENÇAS.

Fase	Fator Climático
Infecção	Molhamento foliar (chuva, orvalho) e temperatura
Incubação, latência e crescimento das lesões	Temperatura do ar e da folha
Esporulação	Molhamento foliar e/ou alta umidade relativa, temperatura,

Fase	Fator Climático
	luz, radiação
Dispersão	Velocidade do vento, temperatura, umidade relativa, molhamento foliar, chuva ou irrigação por aspersão (respingos)
Sobrevivência	Temperatura, umidade relativa, e radiação

FONTE: adaptado – FRIESLAND; SCHRODER -1988.

A interação entre esses fatores e os componentes do triângulo de doença, hospedeiro, patógeno e ambiente, forma a base dos modelos epidemiológicos que buscam prever a ocorrência e severidade das epidemias (ZADOKS; SCHEIN, 1979).

Segundo Velásquez et al. (2018), cada patógeno têm uma condição ambiental ideal para seu crescimento e reprodução. Portanto, as condições favoráveis são específicas para cada patossistema e, assim, não podem ser generalizadas (GHINI, 2005).

3.2.1 Como atua cada fator no desenvolvimento da doença

A partir da compreensão geral sobre o papel dos fatores climáticos no desenvolvimento das doenças fúngicas, torna-se essencial observar como essas variáveis atuam em contextos específicos. Isso porque, conforme discutido acima, as exigências ambientais variam entre diferentes patossistemas. Para ilustrar essas particularidades, este tópico abordará sobre fatores climáticos, como temperatura, umidade relativa e molhamento foliar, considerando patossistemas de relevância agrônoma a exemplo da requeima da batata (*Phytophthora infestans*) e a ferrugem do cafeeiro (*Hemileia vastatrix*). A escolha dessas doenças permite demonstrar como cada fator climático pode favorecer ou limitar o progresso da infecção, a depender da biologia do patógeno, do hospedeiro e das condições ambientais predominantes.

3.2.1.1 Temperatura

No ambiente, a temperatura é um dos principais elementos climáticos que influencia todas as fases de crescimento do hospedeiro. A temperatura pode afetar o patógeno, por meio de interferências diretas no ciclo de vida, na dispersão e na sobrevivência dos microrganismos (AGRIOS, 2005).

No caso da ferrugem do cafeeiro, Pereira et al. (2008) apontam que a faixa de temperatura favorável para o desenvolvimento da doença situa-se entre 20 e 25 °C. Temperaturas acima de 30 °C e abaixo de 15 °C são desfavoráveis à infecção. Entretanto, a epidemia pode acelerar rapidamente em temperaturas intermediárias, entre 15 e 18 °C. Segundo Nutman e Roberts (1963) e Zambolim et al. (2005), a temperatura afeta a germinação dos uredósporos do patógeno, cuja maioria germina a 22°C, enquanto que o processo é inibido abaixo de 15°C e acima de 28°C.

Já no caso da requeima da batata, a ocorrência da doença é favorecida por temperaturas frias e amenas, que variam entre 12 e 24 °C (TÖFOLI et al., 2017). Segundo Krause et al., 1975, essa faixa de temperatura pode ser ainda maior, variando entre 7,2 e 26,6 °C.

3.2.1.2 Umidade Relativa

Segundo Michereff (2001), a umidade relativa é fator predominante no desenvolvimento da maioria das epidemias causadas por fungos, pois facilita a reprodução e a disseminação da maioria dos patógenos.

Considerando a ferrugem do cafeeiro, Chalfoun e Lima (1986) afirmam que os esporos de *H. vastatrix* exigem alta umidade para germinar. Isso é reforçado por Meira et al. (2008), que destacam a temperatura durante o molhamento foliar, associado a umidade relativa acima de 95%, como fator crucial para a infecção.

Essa condição de alta umidade relativa também é favorável ao patógeno *P. infestans*, causador da requeima da batata, no qual tem seus esporângios formados principalmente sob condições de elevada umidade relativa do ar durante o período noturno, sendo mais severo em valores acima de 90% (GOMES, 2002; GRIMM, 2007).

3.2.1.3 Molhamento Foliar

O período de molhamento foliar, oriundo de orvalho, chuva ou irrigação, é essencial para a germinação de esporos e infecção do tecido vegetal, sendo fator crítico na relação patógeno-hospedeiro e no desenvolvimento de doenças de plantas (SENTELHAS, 2004).

De acordo com Töfoli et al. (2017), a requeima da batata é favorecida por períodos de molhamento foliar superiores a 12 horas e ambientes de névoa e chuva fina. Já no caso da ferrugem do cafeeiro, Akutsu (1981) verificou que a infecção pelos uredósporos teve início após aproximadamente seis horas de presença de água livre, atingindo seu pico quando essa condição foi mantida por 24 horas.

3.3 SISTEMAS DE PREVISÃO E AVISOS

Um sistema de previsão de doenças em plantas é aquele que estima a ocorrência ou o aumento da severidade de uma doença com base em informações sobre o ambiente, a cultura agrícola e/ou o patógeno (CAMPBELL; MADDEN, 1990).

Segundo Bergamin Filho e Amorim (2018), há vários objetivos do uso de modelos de previsão de doenças, porém três deles se destacam: maior lucro para o agricultor, decréscimo do risco de ocorrência de epidemias severas e redução da poluição ambiental causada pelo uso em excessivo de agrotóxicos.

Para que um sistema de alerta seja eficaz, é essencial que ele seja adotado e aplicado pelos produtores, os quais precisam perceber que seu uso pode trazer benefícios concretos e mensuráveis (BARBEDO; MEIRA, 2014). Segundo Campbell e Madden (1990), os atributos que asseguram o sucesso de um sistema de alerta incluem sua confiabilidade, facilidade de uso, relevância da doença, utilidade prática, acessibilidade ao produtor, aplicabilidade a diferentes doenças ou pragas e custo-benefício.

Os sistemas de previsão de doenças de plantas podem ser ferramentas fundamentais para otimizar o manejo fitossanitário e trazer benefícios como: maior segurança na tomada de decisão quanto à necessidade de novos tratamentos; facilidade de uso e suporte no manejo de diferentes doenças; aumento da rentabilidade, com a redução do número de pulverizações; diminuição da resistência

de fungos aos fungicidas, devido ao uso racional e localizado dos produtos e menor impacto ambiental, com a redução do uso excessivo de agroquímicos (ARAUJO et al., 2019; BARRETO et al., 2004; BERGAMIN FILHO; AMORIM, 2011; SUTTON, 1996).

3.3.1 Classificação de Modelos de Previsão

Tanto para descrever quanto para compreender o que se passa no campo, os epidemiologistas lançam mão de modelos, que nada mais são que representações simplificadas da realidade (BERGAMIN FILHO; AMORIM, 2018). Os modelos podem ser classificados por diferentes princípios, porém os epidemiologistas geralmente classificam os modelos de doenças de plantas como modelos baseados em dados ou processos (ROSSI et al., 2019; MADDEN, 2006). Desta forma, eles podem ser definidos como modelos empíricos, também chamados de correlativos e descritivos, e explanatórios, também chamados de mecanísticos e teóricos (GOLD, 1977).

Os modelos empíricos exploram o comportamento de um sistema com base em um conjunto de dados observados sem lidar com os mecanismos biológicos subjacentes, ou seja, sem uma representação explícita das relações de causa e efeito entre a planta hospedeira, o patógeno e o ambiente (BERGAMIN FILHO; AMORIM, 2018). O desenvolvimento de modelos empíricos começa com a coleta de dados, onde normalmente requer grandes conjuntos de dados que, em teoria, representam a variabilidade de campo, depois passa pela fase de estabelecimento de relações entre eles e, idealmente termina com uma previsão (GOLD, 1977).

Segundo Madden e Ellis (1988), os modelos empíricos podem ser desenvolvidos de forma qualitativa ou quantitativa. Na forma qualitativa, os critérios são definidos sem o uso de análise estatística formal. Já na forma quantitativa, o desenvolvimento se baseia na análise estatística e na modelagem dos dados observados. O predomínio é de técnicas e métodos, sendo a análise de regressão a mais popular.

Já os modelos baseados em processos, também chamados de modelos explanatórios, descrevem um processo com base em seus mecanismos subjacentes. O desenvolvimento desses modelos parte de uma estrutura conceitual,

e não apenas de dados observados. A partir dessa base, elabora-se o modelo, que é posteriormente testado quanto à sua precisão. Essa abordagem busca compreender a realidade com base em princípios biológicos ou em experimentos prévios conduzidos em diferentes condições (CAMPBELL; MADDEN, 1990; CAMPBELL et al., 1988).

Segundo Bergamin Filho e Amorim (2018), nos modelos explanatórios, o estudo começa com a formulação de uma estrutura conceitual baseada no funcionamento do sistema a ser estudado. Essa representação orienta a coleta de dados e a investigação das relações entre variáveis. O objetivo principal é compreender os processos envolvidos no sistema, o que pode, como consequência, permitir previsões mais fundamentadas e até gerar inferências sobre seu comportamento em diferentes condições.

Os conceitos de previsão e simulação estão fortemente ligados aos tipos de modelos utilizados. A previsão costuma estar associada a modelos empíricos, voltados a descrever padrões e antecipar eventos com base em dados observados. Já a simulação está mais relacionada a modelos explanatórios, que buscam representar os mecanismos internos do sistema e compreender seu funcionamento, sendo a previsão, nesse caso, uma consequência possível (BERGAMIN FILHO; AMORIM, 2018).

De acordo com Bergamin Filho e Amorim (2018), podemos dividir os modelos com base em três situações:

- **Modelos de previsão baseados no inóculo inicial:** Utilizam a quantidade de inóculo presente no começo para prever doenças monocíclicas, policíclicas com poucas gerações ou aquelas em que o inóculo inicial é determinante para a epidemia.
- **Modelo de previsão baseado no inóculo secundário:** Indicados para patógenos com baixo inóculo inicial, mas que podem realizar muitos ciclos secundários.

- **Modelo de previsão baseados no inóculo inicial e no inóculo secundário:** Mais precisos para doenças policíclicas, mas complexos de construir e implementar, exigindo muitos dados.

3.3.2 Aplicações práticas de Sistemas de Previsão de Doenças

3.3.2.1 Requeima da Batata (*Phytophthora infestans*)

A cultura da batata é vulnerável a diversas doenças fúngicas que podem comprometer desde a germinação até a pós-colheita, afetando significativamente a produtividade. Entre essas doenças, destaca-se a requeima, causada pelo oomiceto *P. infestans*, considerada uma das mais destrutivas da história agrícola (TÖFOLI et al., 2017). A requeima apresenta rápido desenvolvimento e elevado potencial de dano, afetando folhas, hastes, pecíolos e tubérculos. As perdas são agravadas pela presença de cultivares suscetíveis, condições climáticas favoráveis ao patógeno e falhas no manejo fitossanitário (TÖFOLI et al., 2013).

O primeiro sistema de alerta para a requeima foi criado na Holanda por Van Everdingen, em 1926, e utilizado pelo serviço holandês de previsão entre 1928 e 1948 (SCHRÖDTER, 1987).

Atualmente, o sistema Blitecast (KRAUSE et al., 1975), desenvolvido nos Estados Unidos, é um dos modelos de alerta mais reconhecidos para a requeima, combinando os métodos de Hyre (1954) e Wallin (1962). Sua primeira fase prevê a ocorrência da doença com base em dez dias chuvosos favoráveis, ou no acúmulo de 18 unidades de severidade. A segunda fase orienta a aplicação de fungicidas com base nos dias chuvosos e nos valores de severidade acumulados nos últimos sete dias, considerando a precipitação, a umidade relativa do ar $\geq 90\%$ e a temperatura média.

O acúmulo de valores de severidade (VS) é calculado conforme a Tabela 2 (KRAUSE, 1975), variando de zero a quatro, de acordo com a temperatura média do ar e o número de horas diárias em que a umidade relativa permanece igual ou superior a 90%.

Tabela 2 - CLASSES DE TEMPERATURA MÉDIA DO AR, DURANTE OS PERÍDOS CONTINUOS DE ACÚMULO DE HORAS COM UMIDADE RELATIVA DO AR MAIOR DO QUE 90% (HUR > 90) E RESPECTIVOS VALORES DE SEVERIDADE (VS) DIÁRIOS PARA O CONTROLE DE REQUEIMA.

Classes de temperatura (°C)	HUR > 90 %				
7,2 – 11,6	≤ 15	16 - 18	19 - 21	22 - 24	24
11,7 – 15,0	≤ 12	13 - 15	16 - 18	19 - 21	> 22
15,1 – 26,6	≤ 9	10 - 12	13 - 15	16 - 18	> 19
VS	0	1	2	3	4

FONTE: Krause et al. (1975).

Em estudo realizado por Bosco et al. (2009), foi avaliada a eficiência do sistema de previsão Blitecast no manejo da requeima da batata (*P. infestans*) em clones suscetíveis e resistentes. O experimento, conduzido em Santa Maria (RS), comparou o uso do Blitecast, baseado em valores acumulados de severidade (VS), com pulverizações semanais e com o tratamento sem aplicação. Os resultados mostraram que, no clone suscetível (Macaca), o Blitecast não foi eficiente para prevenir perdas, resultando em menor área foliar saudável e produtividade quando comparado ao controle semanal. Já nos clones resistentes, não houve diferença significativa entre os tratamentos, indicando que o uso do sistema pode ser dispensado ou ajustado para reduzir aplicações. O estudo destaca a necessidade de calibrar os sistemas de previsão conforme a suscetibilidade da cultivar e as condições climáticas regionais.

Em um outro estudo, realizado por Trentin et al. (2009), também em Santa Maria (RS), avaliou a eficiência do Blitecast no controle da requeima da batata, porém para a cultivar 'Asterix'. Os autores observaram que o uso do modelo com 18 valores de severidade acumulada proporcionou aumento de até 42,6% na produtividade de tubérculos comerciais em relação à ausência de controle químico, além de reduzir significativamente o número de aplicações de fungicidas em até 70% durante períodos secos. O estudo concluiu que o Blitecast é eficaz para orientar a aplicação de fungicidas, sendo especialmente vantajoso em épocas de plantio com menor risco de infecção, como na primavera.

Mais recentemente, um estudo conduzido por Maito et al. (2025) também avaliou a eficácia do modelo de previsão Blitecast no controle da requeima da

batata, desta vez com a cultivar 'Ágata' e considerando duas safras agrícolas no município de Passo Fundo (RS). O trabalho comparou diferentes níveis de severidade acumulada (VS 18, VS 24 e VS 30) com tratamento semanal e a testemunha. Os resultados demonstraram que, assim como resultados obtidos por Trentin et al. (2009), o uso do Blitecast permitiu reduzir significativamente o número de aplicações de fungicidas sem comprometer a produtividade de tubérculos.

3.3.2.2 Doenças da Macieira

O controle das doenças da macieira tem sido baseado, de forma predominante, no uso intensivo de agrotóxicos. Essa abordagem, além de elevar significativamente os custos de produção, apresenta limitações relacionadas à possível emergência de populações de patógenos resistentes, especialmente no caso de fungicidas com modo de ação sítio-específico (ARAUJO et al., 2019; SUTTON, 1996; LIMA et al., 2018)

Uma das doenças da macieira de grande relevância e tipicamente brasileira, é a mancha foliar de *Glomerella* – MFG, ocasionada pelo patógeno *Colletotrichum spp.* (KATSURAYAMA; BONETI; BECKER, 2000). Katsurayama e Boneti (2010), desenvolveu um modelo de previsão para a doença, com base na interação entre temperatura e período de molhamento foliar. No experimento, as plantas inoculadas pelo patógeno foram mantidas em câmara úmida com umidade relativa superior a 98%, no escuro, sob temperaturas controladas de 12 a 26 °C, e submetidas a diferentes durações de molhamento foliar, variando de 8 a 96 horas. A partir dos dados obtidos, os autores construíram uma superfície de resposta que permitiu estimar a severidade da doença em função das variáveis testadas. O modelo resultante foi expresso pela equação: $Y = -91,497 + (7,851 \times T) + (0,243 \times PMF) - (0,177 \times T^2) + (0,021 \times T \times PMF) - (0,002 \times PMF^2)$, em que T representa a temperatura (°C) e PMF o período de molhamento foliar (horas). O estudo demonstrou que a severidade da MFG é fortemente influenciada por essas duas variáveis, e que o modelo pode ser utilizado como base para sistemas de previsão da doença (KATSURAYAMA; BONETI, 2010).

Uma outra doença de grande relevância, e que pode ser considerada a mais importante e estudada para a cultura da maçã, é a sarna da macieira, causada pelo

fungo *Venturia inaequalis* (ARAUJO, 2016). Mills e La Plante (1951) desenvolveu um modelo empírico que é amplamente utilizado mundialmente e relaciona o período de molhamento foliar (PMF) e a temperatura para estimar a infecção por *V. inaequalis*. A aproximadamente 20 °C, a germinação dos esporos ocorre entre 6 e 9 horas de molhamento, com sintomas surgindo cerca de nove dias após a infecção (ARAUJO et al., 2019).

Em um estudo conduzido por Santos et al. (2005), foi avaliada a aplicação da Tabela de Mills como ferramenta para o controle da sarna da macieira na região de Vacaria (RS). O trabalho foi realizado em duas safras e utilizou dados meteorológicos para identificar períodos de infecção com base na relação entre temperatura e duração do molhamento foliar. Os autores observaram que o uso da Tabela de Mills, aliado ao monitoramento da liberação de ascósporos, permitiu reduzir o número de pulverizações em até cinco aplicações em comparação ao método semanal, mantendo a eficácia no controle da doença.

3.3.2.3 Ferrugem do cafeeiro

A ferrugem do cafeeiro (*Hemileia vastatrix*) tornou-se uma das doenças mais importantes em nível mundial após sua introdução nos cafezais brasileiros em 1970, espalhando-se por toda a cafeicultura das Américas em menos de duas décadas (MANSK, 1990).

Kushalappa et al. (1983) e (1984) propuseram o desenvolvimento de um modelo capaz de explicar o curso de ação biológica do patógeno e integrar os vários fatores que influenciam o sistema. Sendo assim, foi desenvolvido um modelo de previsão denominado “razão de sobrevivência líquida para o processo monocíclico” (RSLPM), considerando o inóculo inicial e fatores significativos do ambiente e do hospedeiro que influenciam o processo monocíclico de *H. vastatrix*. Os fatores foram transformados em equivalentes de processo para o ambiente e o hospedeiro, e combinados com o nível de inóculo para formar a RSLPM.

A influência do inóculo, chamada de razão de sobrevivência básica (RSB), foi quantificada com base na incidência (proporção de folhas com ferrugem) ou na severidade (proporção de área foliar afetada). A influência do ambiente, ou equivalente de processo monocíclico para o ambiente (EPMA) foi obtido a partir da

combinação dos efeitos do ambiente sobre a disseminação, influenciada por vento, chuva e densidade de plantas, e sobre a infecção, determinada pela duração do molhamento foliar e pela temperatura. Já o equivalente de processo monocíclico para o hospedeiro (EPMH) considerou a predisposição do cafeeiro à ferrugem, especialmente em situações de alta produção. Sendo assim, a RSLPM foi definida como o produto final da multiplicação das influências do inóculo, do ambiente e do hospedeiro, conforme a equação $RSLPM = RSB \times EPMA \times EPMH$ (KUSHALAPPA, 1984; BARBEDO; MEIRA, 2014).

Foram desenvolvidas equações para prever a taxa de infecção, considerando diferentes parâmetros de área de produção de inóculo no cálculo dos valores de RSLPM e a partir delas, foram definidos limites para indicar a necessidade de aplicação de fungicidas. A partir desses limites, foram desenvolvidos dois sistemas de alerta, um mais simples e outro mais complexo: Sistema simples: A cada 15 dias, quantifica-se a incidência ou severidade da ferrugem e a produção (alta ou baixa), e consulta-se uma tabela com faixas de RSB, EPMA e EPMH para decidir sobre a aplicação de fungicida; Sistema complexo: calcula a RSLPM a cada 14 dias. A aplicação de fungicida é recomendada quando a RSLPM atinge ou supera os limites definidos (KUSHALAPPA, 1984; BARBEDO; MEIRA, 2014).

Em um outro estudo, conduzido por Garçon et al. (2000), foi desenvolvido um modelo de previsão da ferrugem do cafeeiro, na qual se utiliza as variáveis climáticas molhamento foliar e temperatura média durante o período de molhamento, associado à fisiologia da planta e a intensidade da doença. O modelo desenvolvido calcula um valor de severidade da doença (VSD), inspirado na matriz de severidade proposta por Wallin (1962), que é acumulado diariamente com base nas condições climáticas favoráveis ou não ao desenvolvimento da ferrugem. A decisão de aplicar fungicidas é tomada quando o VSD atinge um limiar pré-estabelecido. O modelo foi testado em duas lavouras de *Coffea arabica* da cultivar Catuaí Vermelho, com diferentes cargas pendentes de frutos, localizadas em regiões distintas de Minas Gerais. Os resultados mostraram que o modelo foi tão eficiente quanto o calendário convencional de pulverizações, mas com menor número de aplicações em pelo menos uma das áreas avaliadas, demonstrando o potencial do modelo em racionalizar o uso de fungicidas (GARÇON et al., 2000).

Um outro modelo, desenvolvido pela Embrapa com o apoio do Consórcio Pesquisa Café e em parceria com a Fundação Procafé, analisa e informa o risco de epidemias da ferrugem do cafeeiro por meio de modelos de alerta desenvolvidos com técnicas de mineração de dados. O modelo, denominado sistema de alerta da ferrugem do cafeeiro – SAFCAFE, é um sistema WEB que utiliza dados meteorológicos e da lavoura provenientes de fazendas experimentais da Fundação Procafé no sul de Minas Gerais e dados de previsão de temperatura disponibilizados pelo Agritempo. No sistema WEB, esses dados passam por um processo de preparação e servem de entrada para modelos preditivos, que avaliam as condições propícias ou desfavoráveis ao desenvolvimento da ferrugem. A saída da predição dos modelos é do tipo binária, para alerta e não alerta, levando-se em consideração aumento superior a 5 ou 10 pontos percentuais na incidência da ferrugem. Para emitir o alerta, o sistema analisa em forma de votação as predições realizadas e caso a maioria das predições seja positiva, o alerta é positivo, caso contrário o alerta é negativo (GIROLAMO NETO, 2013; THAMADA et al., 2013; MEIRA et al., 2014; HOLZHAUSEN et al., 2014).

O sistema SAFCAFE foi testado durante três anos agrícolas por MEIRA et al. (2014), no qual relatou que o sistema de alerta foi exato na identificação do início da epidemia da ferrugem nos três anos agrícolas avaliados. Em 2011/2012, o sistema previu corretamente que a evolução mais intensa da doença ocorreria apenas em janeiro de 2012, e não em dezembro de 2011. Nos ciclos seguintes, 2012/2013 e 2013/2014, o início das epidemias foi corretamente identificado em dezembro. De modo geral, o sistema apresentou desempenho satisfatório, especialmente em lavouras com alta carga pendente e quando considerados os alertas baseados no limiar de cinco pontos percentuais.

3.3.2.4 Agroconnect

O Agroconnect é uma plataforma digital criada e lançada em janeiro de 2015 pela Epagri/Ciram (Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina) (MASSIGNAM et al., 2016). Seu principal objetivo é fornecer informações meteorológicas e de favorabilidade climática para o monitoramento de pragas e doenças, bem como para o crescimento e

desenvolvimento de culturas agrícolas no estado de Santa Catarina (MASSIGNAM et al., 2016; RAMOS et al. 2018).

Com acesso público e gratuito por meio de seu portal na internet, o sistema disponibiliza dados meteorológicos e agrometeorológicos provenientes de aproximadamente 310 Plataformas de Coleta de Dados (PCDs) automatizadas, operadas pela Epagri/Ciram em parceria com instituições locais e regionais. (RAMOS et al. 2018). Atualmente, o Agroconnect realiza o monitoramento de mais de 40 culturas agrícolas, emitindo alertas fitossanitários voltados às principais doenças que afetam essas culturas. Além de prever o risco de ocorrência de epidemias agrícolas, a plataforma também disponibiliza dados climáticos registrados pelas estações de coleta, como temperatura, precipitação e umidade relativa do ar. O sistema ainda oferece outros tipos de alertas importantes, como o índice de risco de incêndios florestais e possibilidade de deslizamentos de terra. As informações são apresentadas em três formatos distintos: mapas, gráficos e tabelas, facilitando a interpretação e o uso por técnicos, produtores e demais interessados (MASSIGNAM et al., 2016; RAMOS et al. 2018; BERGAMIN FILHO; AMORIM, 2018).

Para todos os alertas emitidos, foram definidas cinco categorias padronizadas: Sem Alerta (representada pela cor verde), Risco Leve (amarelo), Risco Moderado (laranja), Risco Severo (vermelho) e Sem Dados (cinza) — esta última utilizada quando há falhas na transmissão, problemas na qualidade dos dados ou quando a estação está em manutenção. No mapa da plataforma, os pontos de referência das estações meteorológicas são exibidos com as cores correspondentes à classificação do alerta, facilitando a visualização e interpretação das condições em cada localidade (MASSIGNAM et al., 2016; MARCUZZO et al. 2024).

Cada cultura agrícola disponível na plataforma pode apresentar mais de um alerta fitossanitário, os quais funcionam de forma independente, conforme os modelos específicos desenvolvidos para cada doença. Dessa forma, uma mesma cultura pode exibir alertas distintos, dependendo do tipo de ameaça monitorada (MARCUIZZO et al. 2024). O acesso inicial à plataforma da Epagri/Ciram pode ser feito por meio do site oficial: <https://ciram.epagri.sc.gov.br>. No portal, o usuário deve navegar até o menu “Agricultura”, selecionar a opção “Agroconnect” e, em seguida, acessar o submenu “Atividade Agropecuária”.

3.3.2.5 xarvio® Digital Farming Solutions

O xarvio® Digital Farming Solutions, marca global de agricultura digital da BASF, lançou no Brasil uma solução chamada Timing de Aplicação. Disponível para o cultivo do milho desde a safra 2023/24 e, lançada para a soja na safra 2024/25, a ferramenta da xarvio® é um modelo de algoritmo que combina três variáveis fundamentais para recomendar o momento ideal de aplicação de fungicidas: estágio fenológico da cultura, dados climáticos e suscetibilidade do híbrido a doenças (XARVIO, 2023).

O algoritmo foi construindo após longa coleta de dados sobre ocorrência de doenças, performance de fungicidas e comportamento de híbridos de milho e cultivares de soja nas diversas localidades do país, com o objetivo de traduzir a realidade de cada região. O desenvolvimento envolveu registros em 37 áreas de 21 clientes, com apoio de instituições de pesquisa para garantir a imparcialidade e a representatividade dos dados (XARVIO, 2023).

A validação do modelo foi conduzida pelo time do xarvio® Digital Farming Solutions em áreas experimentais da BASF, bem como em fazendas e institutos de pesquisa parceiros. Os resultados demonstraram que o modelo é capaz de prever a ocorrência de doenças com precisão superior a 70%, permitindo uma abordagem preventiva no manejo fitossanitário. O algoritmo também considera o princípio ativo do fungicida previamente utilizado e seu período de ação, otimizando a janela de aplicação subsequente. A análise é realizada por talhão, com até cinco dias de antecedência, indicando o risco e a doença predominante, o que serve como gatilho para a tomada de decisão (XARVIO, 2023).

A solução está disponível no portfólio de serviços do xarvio® Digital Farming Solutions e, para ter acesso, o agricultor deve se cadastrar na plataforma xarvio® FIELD MANAGER ou encontrar um representante xarvio na sua região (XARVIO, 2023).

3.3.2.6 Sistema de Previsão da Podridão Floral dos Citros

O sistema de previsão da podridão floral dos citros foi desenvolvido pelo Fundecitrus em parceria com a Esalq/USP e a Universidade da Flórida, com o

objetivo de calcular o risco de ocorrência da doença a partir de dados meteorológicos como temperatura e molhamento, que permitem estimar a germinação dos esporos do fungo (FUNDECITRUS, 2025a).

A podridão floral é uma das doenças fúngicas mais importantes da citricultura nas Américas, provocando grandes prejuízos em pomares de diferentes espécies e variedades. As epidemias são explosivas quando há chuvas consecutivas com períodos prolongados de molhamento, tornando o controle químico difícil e muitas vezes ineficaz se não for bem planejado (FUNDECITRUS, 2025a).

O sistema foi lançado em 2016 e desde então, passou por expansões que ampliaram seu alcance (FUNDECITRUS, 2021). Atualmente, o sistema utiliza dados de mais de 200 estações meteorológicas distribuídas em cerca de 170 municípios pelas regiões produtoras, cobrindo 43% do setor citrícola brasileiro (FUNDECITRUS, 2023; 2025b). As informações são coletadas automaticamente pelas estações meteorológicas e processadas pelo sistema, que classifica o risco em quatro níveis: baixo, moderado, alto e extremo, representados por círculos coloridos. O alerta de risco extremo é emitido após dois ou três dias consecutivos de chuva, indicando a necessidade de pulverização imediata nas áreas mais críticas. Para garantir a eficácia do sistema, recomenda-se que o citricultor esteja a no máximo cinco quilômetros de uma estação meteorológica e tenha capacidade de proteger toda a propriedade em até quatro dias após o alerta. Os alertas sobre o risco de ocorrência da doença são enviados diariamente, durante os meses de período crítico para a podridão floral, por e-mail e WhatsApp (FUNDECITRUS, 2025a).

Além de melhorar a eficácia do controle da doença, o sistema também proporciona economia de até 75% nos custos com fungicidas, contribuindo para um manejo mais sustentável e com menor impacto ambiental (FUNDECITRUS, 2025b).

3.4 DESAFIOS E LIMITAÇÕES NA IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMAS DE PREVISÃO

Apesar dos avanços nos sistemas de previsão de doenças de plantas, sua implementação enfrenta barreiras que limitam a adoção ampla e a eficácia em diferentes contextos agrícolas. Essas limitações incluem barreiras de adoção pelos

produtores, escassez de mão de obra qualificada, falta de infraestrutura tecnológica e custos.

3.4.1 Barreiras de Adoção pelos Produtores

Mesmo quando um modelo de previsão apresenta alta qualidade técnica, sua adoção pelos produtores pode ser limitada. Muitos agricultores demonstram resistência a substituir práticas tradicionais, como esquemas fixos de pulverização, por sistemas baseados em previsão, mesmo que estes ofereçam potencial para redução de custos com defensivos. Essa resistência está frequentemente associada à aversão ao risco, especialmente em culturas de alto valor, onde a segurança percebida das práticas convencionais prevalece sobre a inovação (NORTON; MUMFORD, 1993; BERGAMIN FILHO; AMORIM, 2018).

3.4.2 Mão de obra qualificada

Apesar do avanço das tecnologias digitais aplicadas ao agronegócio, a escassez de mão de obra qualificada continua sendo um dos principais entraves para sua adoção efetiva. A digitalização do campo exige profissionais capacitados para operar equipamentos, interpretar dados e aplicar as informações de forma estratégica no processo produtivo. A coleta de dados por sensores, drones, máquinas e sistemas automatizados demanda não apenas infraestrutura, mas também conhecimento técnico para transformar esses dados em decisões assertivas. Nesse contexto, a formação e capacitação contínua dos trabalhadores rurais tornam-se fundamentais para garantir o sucesso das inovações tecnológicas e o aumento da produtividade no setor (BRASIL, 2021).

3.4.3 Infraestrutura Tecnológica e Custos

A conectividade no campo ainda é um dos principais gargalos para a adoção de tecnologias digitais. Muitas regiões rurais não possuem acesso à internet de qualidade, o que limita o uso de sistemas baseados em dados em tempo real. De acordo com o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (BRASIL, 2021),

aproximadamente 70% das propriedades rurais brasileiras ainda não possuem acesso à internet, o que representa cerca de 3,4 milhões de estabelecimentos agropecuários fora do ambiente digital. Essa limitação compromete diretamente a adoção de tecnologias da informação e comunicação, fundamentais para o aumento da produtividade e da eficiência operacional no setor agropecuário (BRASIL, 2021).

Em uma pesquisa conduzida por BOLFE et al. (2021), os produtores rurais relataram que os principais obstáculos para implementar ou aprimorar seus processos produtivos com o uso da agricultura digital são o alto custo de investimento necessário para adquirir máquinas, equipamentos ou aplicativos, a ausência ou precariedade da conexão à internet em áreas rurais, os custos para contratar prestadores de serviços especializados, além da falta de conhecimento sobre quais tecnologias são mais adequadas para suas propriedades.

4 CONCLUSÃO

As doenças fúngicas representam um dos principais entraves à produtividade agrícola, sendo fortemente influenciada por variáveis climáticas como temperatura, umidade relativa e molhamento foliar. A compreensão desses fatores é essencial para o desenvolvimento de estratégias de manejo mais eficientes e sustentáveis. Neste contexto, os sistemas de previsão e aviso surgem como ferramentas promissoras, capazes de antecipar condições favoráveis ao desenvolvimento de doenças e orientar a tomada de decisão quanto ao uso de defensivos agrícolas.

A revisão bibliográfica realizada permitiu identificar diferentes modelos de previsão, desde os empíricos até os explanatórios, bem como suas aplicações práticas em culturas de grande importância econômica, como batata, maçã e café. Os estudos analisados demonstram que, quando bem calibrados e adaptados às condições locais, esses sistemas podem reduzir significativamente o número de aplicações de fungicidas, mantendo a eficácia no controle das doenças e promovendo benefícios econômicos e ambientais.

No entanto, a adoção desses sistemas ainda enfrenta desafios importantes. Barreiras culturais, como a resistência dos produtores a abandonar práticas tradicionais, somam-se à escassez de mão de obra qualificada e à limitada

infraestrutura tecnológica em muitas regiões rurais. Além disso, os custos de implementação e a necessidade de conectividade dificultam a disseminação dessas tecnologias, especialmente entre pequenos e médios produtores.

Dessa forma, conclui-se que os sistemas de previsão e avisos têm grande potencial para transformar o manejo fitossanitário, tornando-o mais racional, eficiente e sustentável. Para que esse potencial seja plenamente alcançado, é necessário investir em políticas públicas que promovam a capacitação técnica, a inclusão digital no campo e o desenvolvimento de modelos acessíveis e adaptáveis à realidade dos diferentes sistemas produtivos. O fortalecimento da integração entre pesquisa, extensão rural e produtores também se mostra fundamental para ampliar o uso dessas ferramentas e garantir sua efetividade no controle de doenças agrícolas.

REFERÊNCIAS

- AGRIOS, G. N. Plant Pathology. 5. ed. San Diego: Academic Press, 2005. 922 p.
- AKUTSU, M. Relação de funções climáticas e bióticas com a taxa de infecção da ferrugem do cafeeiro (*Hemileia vastatrix* Berk. et Br.). 1981. 67 f. Dissertação (Mestrado em Fitopatologia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 1981.
- ARAUJO, L.; MEDEIROS, H.A.; PASA, M.S.; Silva, F.N. Doenças da macieira e da pereira. Informe Agropecuário, Belo Horizonte, v.37, n.291, p.61-74, 2016.
- ARAUJO, L.; PINTO, F. A. M. F.; ARAÚJO FILHO, J. V. de; MEDEIROS, H. A. de; PASA, M. S.; KRUEGER, R. Sistema de alerta e previsões para o controle das doenças da macieira no estado de Santa Catarina. Agropecuária Catarinense, Florianópolis, v. 32, n. 1, p. 86–91, 2019.
- BARBEDO, J. G. A.; MEIRA, C. A. A. TIC na segurança fitossanitária das cadeias produtivas. In: MASSRUHÁ, S. M. F. S. et al. (org.). Tecnologias da informação e comunicação e suas relações com a agricultura. Brasília, DF: Embrapa, 2014. Cap. 9, p. 159–189. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1010735/1/capitulo0910214.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2025.
- BARRETO, M.; VALE, F. X. R.; PAUL, P. A.; SCALOPPI, E. A. G.; ANDRADE, D. A. Sistemas de previsão e estações de aviso. In: VALE, F. X. R.; JESUS JÚNIOR, W. C.; ZAMBOLIM, L. (org.). Epidemiologia aplicada ao manejo de doenças de plantas. Belo Horizonte: Perfil Editora, 2004. p. 242–270.
- BERGAMIN FILHO, A.; AMORIM, L. Sistemas de previsão e avisos. In: AMORIM, L.; REZENDE, J. A. M.; BERGAMIN FILHO, A. (org.). Manual de fitopatologia: princípios e conceitos. 4. ed. v. 1. São Paulo: Agronômica Ceres, 2011. p. 389–408.
- BERGAMIN FILHO, A.; AMORIM, L. Sistemas de previsão e avisos. In: AMORIM, L.; REZENDE, J. A. M.; BERGAMIN FILHO, A. (org.). Manual de fitopatologia: princípios e conceitos. 5. ed. v. 1. São Paulo: Agronômica Ceres, 2018. p. 289–300.
- BOLFE, E. L.; JORGE, L. A. C.; SANCHES, I. D. A. Tendências, desafios e oportunidades da Agricultura Digital no Brasil. Revista Eletrônica Competências Digitais para Agricultura Familiar, v. 7, n. 2, p. 15-36, 2021.
- BOSCO, L. C. et al. Sistema de previsão de ocorrência de requeima em clones de batata suscetíveis e resistentes. Ciência Rural, Santa Maria, v. 39, n. 4, p. 1024–1031, jul. 2009.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Potencialidades e desafios do agro 4.0: GT III “Cadeias Produtivas e Desenvolvimento de Fornecedores” Câmara do Agro 4.0 (MAPA/MCTI), Ministério da Agricultura,

Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Inovação, Desenvolvimento Sustentável e Irrigação. Brasília: Mapa/ACES, 2021.

CAMPBELL, C. L.; MADDEN, L. V. Introduction to plant disease epidemiology. New York: J. Wiley, 1990. 532 p.

CAMPBELL, C. L.; REYNOLDS, K. M.; MADDEN, L. V. Modeling epidemics of root diseases and development of simulators. In: KRANZ, J.; ROTEM, J. (Ed.) Experimental techniques in plant disease epidemiology. Berlin: Springer-Verlag, 1988. p. 253-265.

CHALFOUN, S.M.; LIMA, R D. de. Influência do clima sobre a incidência de doenças infecciosas. Informe Agropecuário, Belo Horizonte, v.12, n.138, p.31-36, 1986.

FERNANDES, J. M. C.; DEL PONTE, E. M.; PAVAN, W. Modelos de previsão de doenças de plantas: passado, presente e futuro. Tropical Plant Pathology, v. 44, p. 313–324, 2019.

FUNDECITRUS. Crescimento do Sistema de previsão da podridão floral possibilitou alertas mais precisos durante a florada dos citros. 2021. Disponível em: <https://www.fundecitrus.com.br/noticias/crescimento-do-sistema-de-previsao-da-podridao-floral-possibilitou-alertas-mais-precisos-durante-a-florada-dos-citros/>. Acesso em: 02 ago. 2025.

FUNDECITRUS. Relatório de Atividades - Jun/2022 - Mai/2023. Araraquara, 2023. 84 p. Disponível em: <https://fundecitrus.com.br/wp-content/uploads/2025/04/Relatorio-Anual-2023.pdf>. Acesso em: 02 ago. 2025.

FUNDECITRUS. Pragas e Doenças: Podridão floral. 2025a. Disponível em: <https://www.fundecitrus.com.br/pragas-e-doencas/podridao-floral/>. Acesso em: 02 ago. 2025.

FUNDECITRUS. Podridão floral: Fundecitrus inicia envio de alerta de risco para a doença. 2025b. Disponível em: <https://www.fundecitrus.com.br/noticias/podridao-floral-fundecitrus-inicia-envio-de-alerta-de-risco-para-a-doenca/>. Acesso em: 02 ago. 2025.

FRAC-BR. Manejo de resistência. 2025. Disponível em: <https://www.frac.br.org/manejo-de-resistencia>. Acesso em: 18 maio 2025.

FRIESLAND, H.; SCHRÖDTER, H. The analysis of weather factors in epidemiology. In: Kranz, J.; Rotem, J. (Eds.). Experimental techniques in plant diseases epidemiology. Berlin. Springer-Verlag. 1988. pp.115-133.

GARÇON, C. L. P.; ZAMBOLIM, L.; VALE, F. X. R. DO; MIZUBUTI, E. S. G.; ALTMANN, T.; PAIVA, S. B. Modelo de previsão da ferrugem (*Hemileia vastatrix* Berk. & Br.) do cafeeiro (*Coffea arabica* L.). In: Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil (1.: 2000: Poços de Caldas, MG). Resumos expandidos. Brasília, D.F.: Embrapa Café; Belo Horizonte: Minasplan, 2000. 2v. (1490p.), p. 230-234.

GHINI, R. Mudanças climáticas globais e doenças de plantas. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2005.

GIROLAMO NETO, C. di. Desenvolvimento e avaliação de modelos de alerta para a ferrugem do cafeeiro. 2013. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2013.

GOLD, H. Mathematical Modeling of Biological Systems - An Introductory Guide, New York, Wiley, 1977.

GOMES, C. B. et al. Viabilidade do uso da previsão no controle da requeima (*Phytophthora infestans*) em batata nas regiões de Pelotas e São Lourenço do Sul-RS. Comunicado Técnico – MAPA. Pelotas – RS. 2002.

GOTTEMS, L. Brazil Embrapa discloses 2 new genomes of *Phakopsora pachyrhizi*, the cause of Asian rust. AgroPages, 19 abr. 2021. Disponível em: <https://news.agropages.com/News/NewsDetail---38814.htm>. Acesso em: 26 jun. 2025.

GRIMM, E. L. Efeito de diferentes níveis de irrigação na produtividade e ocorrência de requeima na cultura da batata. 2007. 70 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/7619/Edenir%20Luis%20Grimm.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 18 jun. 2025.

HYRE, R.A. Progress in forecasting late blight of potato and tomato. Plant Disease Reporter, Illinois, v. 38, n. 4, p. 245 - 253, 1954.

HOLZHAUSEN, P. P. P.; THAMADA, T. T.; MEIRA, C. A. A. Safcafe - sistema de alerta da ferrugem do cafeeiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEEIRAS, 40., 2014, Serra Negra. Anais... Brasília, DF: Embrapa Café, 2014.

KATSURAYAMA, Y.; BONETI, J. I. da S.; BECKER, W. F. Mancha foliar da Gala: principal doença de verão da cultura da macieira. Agropecuária Catarinense, v. 13, n. 3, p. 14–19, 2000.

KATSURAYAMA, Y.; BONETI, J. I. da S. Modelo de previsão da mancha da gala na macieira baseado na temperatura e na duração do molhamento foliar. Revista Agropecuária Catarinense, Florianópolis, v. 23, n. 3, p. 82–84, 2010.

KRAUSE, R.A. et al. BLITECAST a computerized forecast of potato late blight. Plant Disease Reporter, v.59, p.95-98, 1975.

KUSHALAPPA, A. C.; AKUTSU, M.; LUDWIG, A. Application of survival ratio for monocyclic process of *Hemileia vastatrix* in predicting coffee rust infection rates. Phytopathology, St. Paul, v. 73, n. 1, p. 96-103, 1983.

KUSHALAPPA, A. C.; AKUTSU, M.; OSEGUERA, S. H.; CHAVES, G. M.; MELLES, C. Equations for predicting the rate of coffee rust development based on net survival

ratio for monocyclic process of *Hemileia vastatrix*. *Fitopatologia Brasileira*, Brasília, DF, v. 9, p. 255-271, jun. 1984.

LIMA N.V.; ARAUJO L.; PINTO F.A.M.F. Efeito preventivo e curativo de fungicidas sítio-específico para o controle da mancha foliar de *Glomerella*. In: SEMINÁRIO NACIONAL SOBRE FRUTICULTURA DE CLIMA TEMPERADO, 13., 2018, São Joaquim. Anais... Florianópolis: Epagri, 2018. p. 200.

MADDEN, L. V.; ELLIS, M. A. How to develop plant disease forecasters. In: KRANZ, J.; ROTEM, J. (Ed.) *Experimental techniques in plant disease epidemiology*. Berlin: Springer-Verlag, 1988. p. 191-208.

MADDEN, L. V. Botanical epidemiology: some key advances and its continuing role in disease management. *European Journal of Plant Pathology*, Dordrecht, v. 115, p. 3–23, 2006.

MAITO, G.; MAGRO, M. P.; MALDANER, S. Z. D.; CAUS, L. V. Controle da requeima da batateira com base em modelo de previsão do tipo alerta. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 55, n. 4, 2025.

MANSK, Z. Doenças do cafeeiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEEIRAS, 16, Espírito Santo do Pinhal: Faculdade de Agronomia e Zootecnia. Resumos Expandidos... Rio de Janeiro: IBC, 1990 p.61-77.

MARCUZZO, L. L.; VIEIRA, H. J.; MISZINSKI, J. Sistemas de previsão de doenças de plantas: da literatura ao uso aplicado em uma plataforma WEB. *Revista Agronomia Brasileira*, v. 8, 2024.

MASSIGNAM, A.M.; PANDOLFO, C.; RICCE, W.S.; VIEIRA, H.J.; BRAGA, H.J. A agrometeorologia operacional em Santa Catarina. *Agrometeoros*, v. 24, n. 1, p. 55-63. 2016.

MEINHARDT, L. W.; RINCONES, J.; BAILEY, B. A. et al. *Moniliophthora perniciosa*, the causal agent of witches' broom disease of cacao: biology, epidemiology, and control. *Phytopathology*, v. 98, p. 1055–1066, 2008.

MEIRA, C. A. A.; RODRIGUES, L. H. A.; MORAES, S. A. Análise da epidemia da ferrugem do cafeeiro com árvore de decisão. *Tropical Plant Pathology*, v.33, n.2, p.114 124, 2008.

MEIRA, C. A. A.; THAMADA, T. T.; HOLZHAUSEN, P. P. P. Avaliação do SAFCAFE – Sistema de Alerta da Ferrugem do Cafeeiro em três anos agrícolas. In: Congresso Brasileiro de Pesquisas Cafeeiras, 40., 2014, Serra Negra. Anais... Varginha: Fundação Procafé, p. 220-221, 2014.

MICHEREFF, S. J. Fundamentos de Fitopatologia. Recife: Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2001.

MILLS, W.D.; LA PLANTE, A.A. Diseases and insects in the orchard. Cornell Extension Bulletin, New York, v. 711, n. 812, p. 1-100, 1951.

NIZAMANI, M. M.; HUGHES, A. C.; ZHANG, H.; WANG, Y. Revolutionizing agriculture with nanotechnology: innovative approaches in fungal disease management and plant health monitoring. *Science of The Total Environment*, v. 928, p. 172-473, 2024.

NORTON, G. A.; MUMFORD, J. D. Decision analysis techniques. In: NORTON, G. A.; MUMFORD, J. D. (Ed.). *Decision tools for pest management*. Wallingford: CABI International, 1993. p. 43–68.

NOWICKI, M.; FOOLAD, M. R.; NOWAKOWSKA, M.; KOZIK, E. U. Potato and tomato late blight caused by *Phytophthora infestans*: an overview of pathology and resistance breeding. *Plant Disease*, v. 96, n. 1, p. 4–17, 2012.

NUTMAN, E. J.; ROBERTS, F. M. Studies on the biology of *Hemileia vastatrix* Berk. et Br. *Transactions of British Mycological Society, Cambridge*, v. 46, n. 1, p. 27-48, 1963.

PEREIRA, A. R.; CAMARGO, A. P.; CAMARGO, M.P. *Agrometeorologia de cafezais no Brasil*. Campinas: INSTITUTO AGRONÔMICO, 2008. 127 p.

RAMOS, R. A. dos S. et al. Avanços e inovações tecnológicas no monitoramento agrometeorológico: Sistema Agroconnect. *Incapar em Revista, Vitória*, v. 9, p. 90–96, 2018.

ROSSI, V.; SPERANDIO, G.; CAFFI, T.; SIMONETTO, A.; GILIOLI, G. Critical success factors for the adoption of decision tools in IPM. *Agronomy, Basel*, v. 9, n. 11, p. 710, 2019.

SANTOS, M. C.; FURTADO, E. L.; SANHUEZA, R. M. V. Controle da sarna da macieira com utilização da Tabela de Mills na região de Vacaria - RS. *Summa Phytopathologica*, v. 31, n. 3, p. 254-260, 2005.

SAVARY, S.; WILLOCQUET, L.; PETHYBRIDGE, S. J.; et al. The global burden of pathogens and pests on major food crops. *Nature Ecology & Evolution*, v. 3, p. 430–439, 2019.

SCHRÖDTER, H. *Wetter und Pflanzenkrankheiten. Biometeorologische Grundlagen der Epidemiologie*. Berlin: Springer-Verlag, 1987, 191p.

SENTELHAS, P. C. Duração do período de molhamento foliar: aspectos operacionais da sua medida, variabilidade espacial em diferentes culturas e sua estimativa a partir do modelo de Penman-Monteith. 2004. 161 f. Tese (Livre-docência em Agrometeorologia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/livredocencia/11/tde-07062006-073629/publico/TeseLivreDocenciaCompleta.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2025.

STRANGE, R. N.; SCOTT, P. R. Plant disease: a threat to global food security. *Annual Review of Phytopathology*, v. 43, p. 83–116, 2005.

STUKENBROCK, E.; GURR, S. Address the growing urgency of fungal disease in crops. *Nature*, v. 617, p. 30–33, 2023. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/d41586-023-01465-4>. Acesso em: 02 jul. 2025.

SUTTON, T.B. Changing options for the control of deciduous fruit tree diseases. *Annual Review of Phytopathology*, Saint Paul, v. 34, n. 1, p. 527-547, 1996.

THAMADA, T. T.; GIROLAMO NETO, C. di; MEIRA, C. A. A. Sistema de alerta da ferrugem do cafeeiro: resultado de um processo de mineração de dados. In: Congresso Brasileiro de Agroinformática, 9., 2013, Cuiabá. Anais... Cuiabá: Editora UFMT, 2013.

TÖFOLI, J. G. et al. Requeima e pinta preta na cultura da batata: importância, características e manejo sustentável. *Biológico*, São Paulo, v. 75, n. 1, p. 33-40, 2013.

TÖFOLI, J. G.; DOMINGUES, R. J. Doenças fúngicas. In: BRANDÃO FILHO, J. U. T. et al. (Orgs.). *Hortaliças-fruto*. Maringá: EDUEM, 2018. p. 271–313.

TÖFOLI, J. G.; DOMINGUES, R. J.; ZANOTTA, S. Doenças fúngicas da batata. In: SALAS, F. J. S.; TÖFOLI, J. G. (Eds.). *Cultura da batata: pragas e doenças* São Paulo, SP: Instituto Biológico, 2017. v. 1, cap. 7, p. 152-206.

TRENTIN, G. et al. Controle da requeima em batata cv. 'Asterix' como base para modelos de previsão da doença. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 39, n. 2, p. 393–399, 2009

VALE, F. X. R.; ZAMBOLIM, L. Influência da temperatura e da umidade nas epidemias de doenças de planta. *Revisão Anual de Patologia de Plantas*, Passo Fundo, v. 4, p. 149–207, 1996

VELÁSQUEZ, A. C.; CASTROVERDE, C. D. M.; HE, S. Y. Plant and pathogen warfare under changing climate conditions. *Current biology: CB*, v. 28, n. 10, p.619–634, 2018.

WALLIN, J.R. Summary of recent progress in predicting late blight epidemics in United States and Canada. *American Potato Journal*, Orono, v.39, p.306-312, 1962.

XARVIO. xarvio® FM Timing de Aplicação. 2023. Disponível em: <https://www.xarvio.com/br/pt/noticias/xarvio-fm-timing-de-aplicacao.html>. Acesso em: 2 jul. 2025

ZADOKS, J. C.; SCHEIN, R. D. *Epidemiology and Plant Disease Management*. Oxford University Press, 1979.

ZAMBOLIM, L.; VALE, F. X. R.; ZAMBOLIM, E. M. Doenças do cafeeiro. In: KIMATI, H. et al. (org.). Manual de fitopatologia. 4. ed. v. 2. São Paulo: Agronômica Ceres, 2005. p. 165–180.