

Bento Gonçalves, RS / Julho, 2024

Atualizações de alertas de míldio da videira em uma versão do algoritmo Embrapa/MAHM para microrregiões

Fábio Rossi Cavalcanti, Marcos Botton e João Caetano Fioravango

Pesquisadores, Embrapa Uva e Vinho, Bento Gonçalves, RS.

Resumo – O presente estudo trata de atualizações sobre ensaios de validação de um algoritmo MAHM (versão MAHM3-O2) capaz de orientar a proteção de vinhedos (*labrusca* e *vinífera*) contra o míldio da videira mediante redução de pulverizações. A versão atual MAHM3-O2 trabalhou com vinhedos cadastrados dentro de áreas monitoradas (microrregiões), demarcadas por três microestações de IoT no perímetro externo. Versões anteriores do algoritmo trabalhavam com demarcações com perímetros menores, circunscritas a apenas um vinhedo. Os ensaios de validação foram realizados nas safras 2021/2022 e 2022/2023, em Bento Gonçalves, RS e Pinto Bandeira, RS. A redução de aplicações de fungicida para garantir a proteção de *labruscas* ('Isabel' e 'Niágara rosada') variou de 15 a 37% na safra 2021/2022, 15 a 63% na safra 2022/2023 e, para a proteção do vinhedo 'Chardonnay' (*vinífera*), na safra 2022/2023, as reduções variaram de 50 a 67%, em comparação com esquemas de proteção adotados por departamentos técnicos de vinícolas da região. A versão do algoritmo no estudo mostra potencial para gerar alertas de doença em áreas maiores, podendo ser usado para marcar a proteção de vinhedos internos a microrregiões, mediante pulverização tratorizada. Paralelamente, o MAHM pode se desdobrar em sistemas mais precisos e acurados para futuras aplicações de fungicidas por robôs, seja por estratégia de *software*: refinamento de equações de favorabilidade, incorporação de bibliotecas de aprendizado de máquina e inteligência artificial no algoritmo; seja por incremento de *hardware*: adição de novos sensores às microestações de IoT que fazem suporte da rede em triangulação (paradigma).

Termos para indexação: *Plasmopara viticola*, agricultura de precisão, alerta de doença, previsão de doença, controle químico.

Alert updates for vineyard downy mildew control sprayings with the Embrapa/MAHM Algorithm

Abstract – This study updates the validation tests of a MAHM algorithm (MAHM3-O2 version) capable of protecting vineyards (*labrusca* and *vinifera*) against downy mildew through the reduction of sprays. The current MAHM3-O2 version worked with registered vineyards within monitored areas (micro-regions), marked by three IoT micro-stations on the external perimeter.

Embrapa Uva e Vinho

Rua Livramento, nº 5151
Caixa Postal 130
95701-008 Bento Gonçalves RS
www.embrapa.br/uva-e-vinho
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Comitê Local de Publicações

Presidente

Henrique Pessoa dos Santos

Secretária-executiva

Renata Gava

Membros

Edgardo Aquiles Prado Perez,

Fernando José Hawerth,

Mauro Celso Zanús, Joelsio

José Lazzarotto, Jorge Tonietto,

Rochelle Martins Alvorcem, Thor

Vinicius Martins Fajardo

Revisão de texto

Renata Gava

Normalização bibliográfica

Rochelle Martins Alvorcem

(CRB-10/1810)

Projeto gráfico

Leandro Sousa Fazio

Publicação digital: PDF

Todos os direitos
reservados à Embrapa.

Previous versions of the algorithm worked with markings with smaller perimeters, circumscribed to just one vineyard. The validation tests were carried out in the 2021/2022 and 2022/2023 seasons, in Bento Gonçalves, RS and Pinto Bandeira, RS. The reduction of fungicide applications to ensure the protection of labruscas ('Isabel' and 'Niágara rosada') ranged from 15 to 37% in the 2021/2022 harvest, 15 to 63% in the 2022/2023 harvest, and for the protection of the 'Chardonnay' vineyard (vinífera) in the 2022/2023 harvest, the reductions ranged from 50 to 67%, compared to protection schemes adopted by technical departments of wineries in the region. The version of the algorithm in the study shows potential to generate disease alerts in larger areas, and can be used to mark the protection of internal vineyards to micro-regions, through tractor spraying. In parallel, the MAHM can evolve into more precise and accurate systems for future applications of fungicides by robots, whether by software strategy: refinement of favorability equations, incorporation of machine learning libraries and artificial intelligence into the algorithm; or by hardware increment: addition of new sensors to the IoT micro-stations that support the triangulation network.

Index terms: *Plasmopara viticola*, precision agriculture, disease alert, disease forecast, chemical control.

Introdução

A epidemiologia é o estudo das mudanças espaciais e temporais que ocorrem durante epidemias de doenças de planta causadas por populações de patógenos em populações de plantas (Campbell; Madden, 1990). Trata-se de um campo multidisciplinar que envolve biologia vegetal, ecologia, genética e estatística. Ela se tornou cada vez mais importante nos últimos anos devido ao aumento da incidência de doenças de plantas em todo o mundo, impulsionado por fatores como comércio global, mudanças climáticas e intensificação da agricultura. O entendimento de processos epidemiológicos pode ajudar a prever e prevenir epidemias, desenvolver medidas de controle mais eficazes e promover a produção agrícola sustentável, além de reduzir custos (Campbell; Madden, 1990).

Uma das aplicações da epidemiologia é o seu uso em sistemas de alerta de doenças de planta, que vem se tornando cada vez mais importantes na Agricultura de Precisão (AP), pois podem

fornecer alerta precoce nas culturas ao permitir que os agricultores tomem medidas apropriadas para prevenir ou mitigar o impacto dessas doenças. Atualmente, até imagens de satélite e drones são capazes de detectar alterações fisiológicas no tecido das plantas que indiquem infecção por patógenos. Tecnologias de imagem podem fornecer dados em alta resolução, em tempo real, permitindo a detecção de sintomas de doenças antes que se tornem visíveis a olho nu. Por exemplo, sensores hiperespectrais em veículos aéreos não tripulados (Vants) são capazes de detectar padrões espectrais de várias infecções. Como exemplo, um estudo mostrou que este sistema apresentou alta precisão (99%) na detecção da esca em folhas de videira, demonstrando seu potencial como sistema de alerta de doenças de plantas (Al-Saddik et al., 2018).

A diversidade das abordagens tecnológicas é grande. Há, por exemplo, esforços no sentido de envolver o uso de nanossensores para detectar patógenos específicos ou marcadores de doenças em tecidos vegetais ou no solo. Nanossensores são componentes menores que 100 nm capazes de transmitir informações físicas, químicas ou biológicas a partir de eventos de reconhecimento de meio-ambiente (Shaw; Honeychurch, 2022). Esses sensores podem fornecer detecção rápida e precisa de doenças, mesmo antes de se tornarem visíveis a olho nu. Além disso, podem ser integrados a dispositivos móveis, permitindo que técnicos monitorem cultivos em tempo real e, ainda num padrão de agricultura 4.0 (dependente da decisão humana), tomem as medidas adequadas para prevenir ou mitigar o impacto de doenças. Uma recente revisão discutiu o potencial dos nanossensores para a detecção de doenças de plantas causadas por bactérias, vírus e fungos. Foram destacadas suas vantagens como detectores de alta sensibilidade, especificidade e rápido tempo de resposta, podendo ser eletroquímicos, ópticos e magnéticos, todos com grande potencial em incorporar-se em sistemas de alerta (Shaw; Honeychurch, 2022).

Mesmo com as novidades acima, sistemas de previsão e alerta de doenças baseados na estrutura clássica de algoritmos alimentados por dados climáticos (Campbell; Madden, 1990), sobre a qual o Embrapa/MAHM se fundamenta, podem prosperar e competir com essas tendências. Isso, porque

nada mudou na importância do ambiente como fator fundamental do triângulo epidemiológico (Liu; He, 2019; Cavalcanti, 2021). Atualmente, modelos matemáticos clássicos de previsão são confrontados com algoritmos de aprendizado de máquina (AM) para analisar dados de outras fontes, como previsões do tempo, níveis de umidade do solo e relatórios de incidência de doenças. Além disso, eles podem aprender continuamente com novos dados, melhorando sua precisão ao longo do tempo (Wrzesień et al., 2019; Velasquez-Camacho et al., 2023). Para a AP, sistemas de alerta de doenças de plantas são um componente crítico. À medida que essas tecnologias continuam a evoluir e melhorar, elas têm o potencial de revolucionar a indústria agrícola, aumentando o rendimento das colheitas, reduzindo o uso de pesticidas e outros produtos químicos e garantindo a segurança alimentar para as gerações futuras (Velasquez-Camacho et al., 2023).

O Embrapa/MAHM¹ (INPI: BR512019002684-5, 2019) é um algoritmo que propõe o uso de pelo menos três microestações de IoT em triangulação para a construção de redes de monitoramento associadas à favorabilidade de uma determinada doença (Figura 1). Após estudos de interpolações de temperatura e umidade relativa do ar, o algoritmo exporta *datasets* de favorabilidade, por quadrantes, para que métodos de alerta (por exemplo, o Ozzy) possam impulsionar aplicações e/ou Interfaces de Programação de Aplicação (APIs) na geração de alertas georreferenciados de doença e mapas temáticos (*heat maps*). Esses alertas visam

a aplicações específicas de fungicida dentro de área produtiva, no tempo e no espaço (Cavalcanti, 2021).

Um recente estudo constatou que o uso de um sistema de apoio à decisão (EPI) levou a uma redução de 40% no número de tratamentos fungicidas em vinhedos localizados em *Chianti Bio-District* (Biodistretto del Chianti), Itália (Maddalena et al., 2023). Rossi et al. (2012) apresentam uma visão geral dos sistemas de apoio à decisão de pulverização para proteção de cultivos, incluindo sua aplicação em vinhedos. Os autores relatam que o sistema de suporte (DSS) pode ajudar a reduzir o número de tratamentos com fungicidas em até 30% em alguns casos. Um estudo com morangueiro apresentou o potencial de sistemas de previsão de doenças baseados na web *Strawberry Advisory System* (SAS) para reduzir as aplicações de fungicidas. Os autores evidenciaram que o uso de seu sistema levou a uma redução de 25 a 50% no uso de fungicidas (Pavan et al., 2011). Outra pesquisa avaliou um sistema de alerta para o controle do míldio da uva a partir de infecções primárias e constatou que ele pode levar a uma redução de metade a dois terços no número de aplicações de fungicidas, em comparação com a abordagem tradicional baseada em calendário (Caffi et al., 2010).

O objetivo do presente estudo é o de apresentar experimentos de proteção de vinhedos contra o míldio da videira por pulverizações realizadas mediante alertas gerados pelo MAHM em duas safras: 2021/2022 e 2022/2023. O método de alerta usado foi uma versão atualizada (nº 2) do método

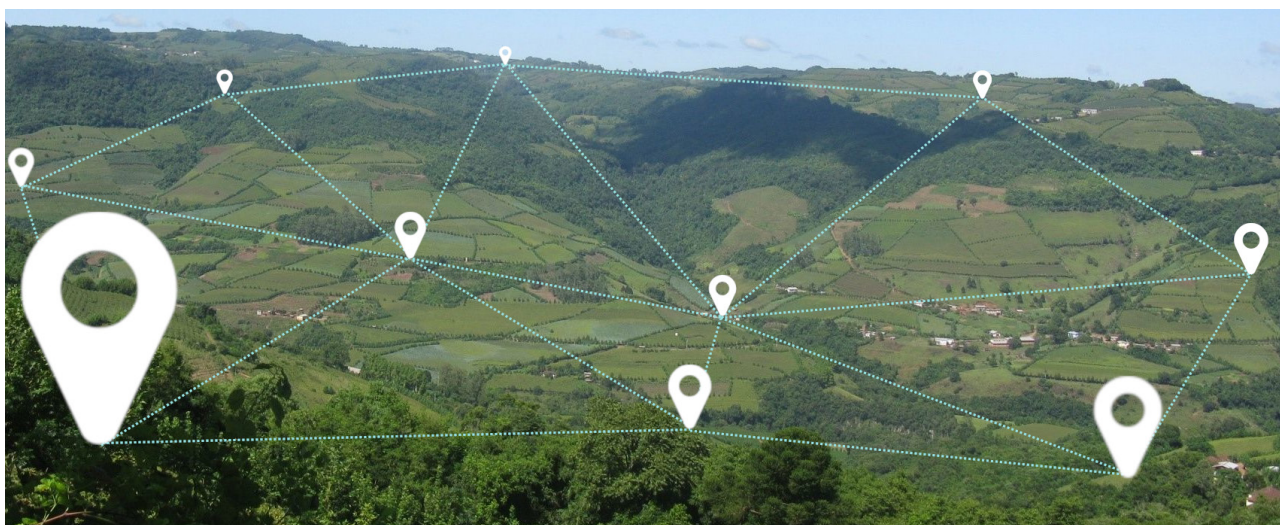


Foto: Marcos Botton

Figura 1. Paradigma de triangulações de microestações de IoT e redes de monitoramento para estudos de interpolação gerando mapas de favorabilidade/alerta de doença trazido pelo MAHM.

Ozzy como API de alerta ao MAHM (Cavalcanti, 2021), o método “O-2”. A presente versão (MAHM3-O2) trabalha com a triangulação de microestações (MSs, paradigma do MAHM) definindo uma microrregião ou área monitorada (AM) de 5 a 10 ha, onde vinhedos inscritos a ela podem ser cadastrados ao monitoramento de míldio. As versões anteriores trabalhavam com uma triangulação de MSs definindo o monitoramento de um único vinhedo.

Material e métodos

Vinhedos experimentais e método de avaliação do controle do míldio

Ensaio de campo foram conduzidos em dois vinhedos da Embrapa Uva e Vinho: ‘Isabel’ (*Vitis labrusca* x *Vitis vinifera*) e ‘Niágara rosada’ (*Vitis labrusca*) entre os meses de setembro e dezembro do ano da rebrota das plantas, para as safras 2021/2022 e 2022/2023.

A disposição das linhas em ambos os vinhedos foi no sentido oeste-leste, com inclinação entre 20–30° norte (GPS: -29.161956, -51.528818, ‘Isabel’ e -29.16374, -51.52828, ‘Niágara’). Seguindo metodologia definida em Cavalcanti (2021), linhas centrais sem bordadura de fileira e de linha foram selecionadas para o monitoramento de míldio. Na mesma janela mensal, um vinhedo ‘Chardonnay’ (*Vitis vinifera*) foi experimentado em área parceira, em Pinto Bandeira, RS (GPS: -29.123081, -51.446263) apenas para a safra 2022/2023. Para as avaliações do monitoramento, foram adotadas parcelas com cinco plantas em linha por repetição englobando todo o vinhedo, para cada vinhedo experimental. As parcelas foram situadas em espaçamento de 1 m entre plantas e 1,5 m entre fileiras nos dois vinhedos.

Seguindo o mesmo critério de Cavalcanti (2021), foram anotadas a incidência e severidade de sintomas e sinais de míldio apresentados em folhas e cachos, a partir de inoculação natural no vinhedo. Avaliações da doença foram feitas em todas as folhas de dois ramos marcados nas plantas. Avaliações de sintomas/sinais foram realizadas por meio de avaliador humano validado por *software* (Ampese et al., 2017), tendo uma escala gráfica (Azevedo, 1998) dividida em cinco classes de doença como referência para cobrir 0 a 100% de severidade. Leituras foram submetidas à transformação angular $\omega_{(i)} = \arcsen [ID_{(i)}^{1/2}]$ para realização de testes de normalidade e inferências estatísticas a 5% de probabilidade.

Valores de Índice de Doença (ID%) foram considerados para a quantificação de severidade de doença (Czermainski, 1999) e demais variáveis para o monitoramento de doença seguiram Cavalcanti et al., 2020.

Composição e versão do algoritmo

Os alertas de pulverização para os ensaios de campo nas duas safras trabalhadas, nos vinhedos descritos, foram gerados pela última versão do algoritmo (MAHM3-O2), concluída no segundo semestre de 2021. Enquanto que nas versões anteriores do MAHM a triangulação de microestações (MSs) definia um único vinhedo, no MAHM3-O2 a triangulação formaliza uma “área monitorada” com o quadrilátero projetado a partir dos vértices da triangulação. Dentro dessa área monitorada os vinhedos podem ser inscritos e discriminados em função da sensibilidade ao míldio associada à variedade de videira que compõe o vinhedo e em função de quatro pontos que demarcam o tal vinhedo.

Todas as demarcações do MAHM3-O2 são feitas por coordenadas em graus DD convertidas para UTM pelo *pyproj*: `Proj("+proj=utm +zone=22 +south +units=m +ellps=aust_SA +towgs84=-67.35,3.88,-38.22 +units=m +no_defs")`.

Captação dos dados de microclima e controle do míldio da videira com alertas gerados pelo MAHM (método O-2)

Na safra 2022/2023 os mesmos vinhedos experimentais da Embrapa Uva e Vinho (‘Isabel’ e ‘Niágara rosada’) e mais um vinhedo ‘Chardonnay’ de Pinto Bandeira, RS, foram protegidos com pulverizações indicadas por alertas gerados pelo mesmo método de alerta ligado ao MAHM (MAHM3-O2) (Figuras 2, 3 e 4). As avaliações foram realizadas entre os meses de setembro a dezembro nos anos de 2021 e 2022. Em 2021, para os vinhedos ‘Isabel’ e ‘Niágara’, na Embrapa Uva e Vinho, as parcelas de monitoramento internas foram avaliadas semanalmente a partir das respectivas datas de rebrota durante 17 semanas (2.856 horas) (Figuras 2 e 3).

Os calendários de pulverizações para os dois vinhedos seguiram de modo independente um do outro. Nas duas safras estudadas, as áreas monitoradas foram definidas por três estações de IoT. Na Embrapa Uva e Vinho (2021 e 2022) os modelos foram uma LoRAIN (-29,164472, -51,164472) e duas LoRATH fechando a triangulação (-29,166002, -51,538284; -29,162315, -51,534008), versões de

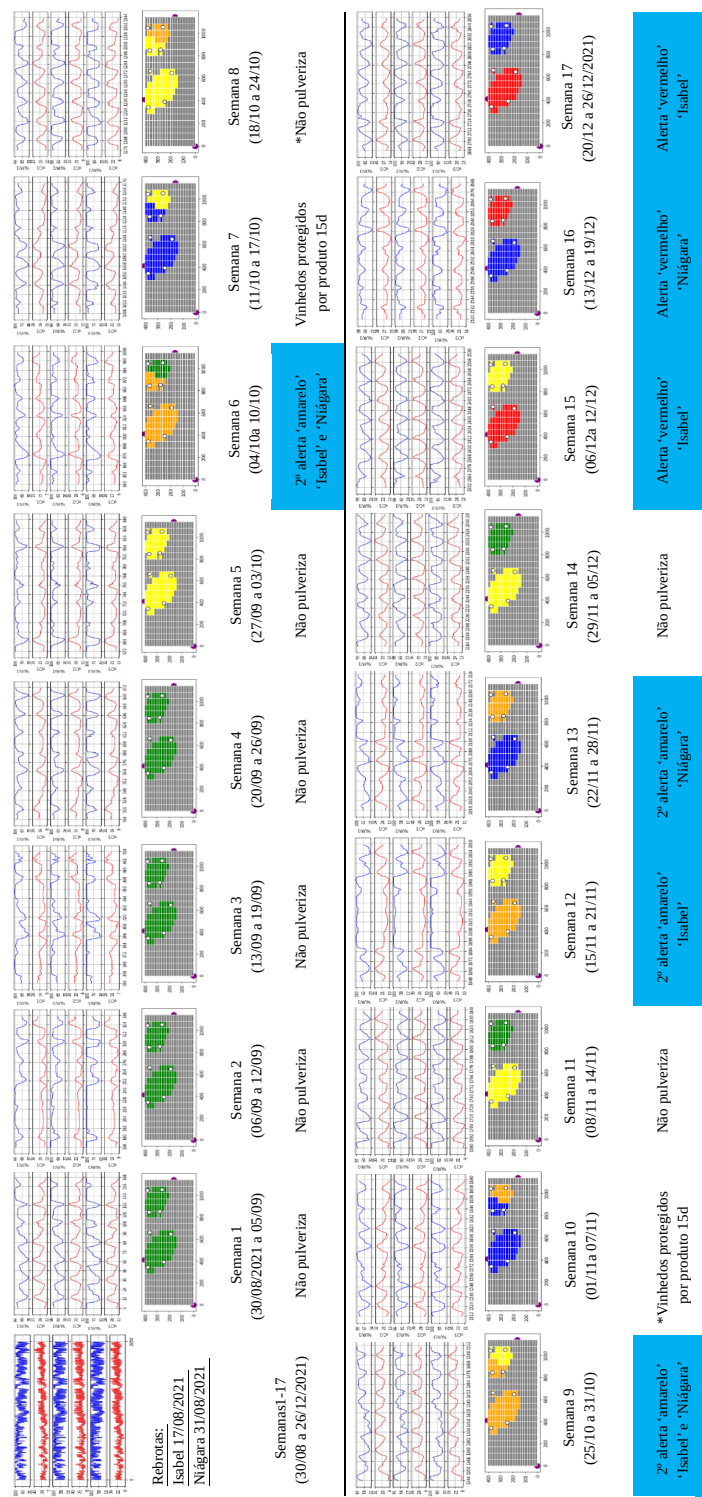


Figura 2. Primeira linha: perfis climáticos (°C, em vermelho, e % UR, em azul) e respectivos mapas temáticos (segunda linha) gerados pelo método MAHM3-O2 para o controle de míldio nos vinhedos 'Isabel' e 'Niágara rosada' da Embrapa Uva e Vinho, na safra 2021/2022. Para a emissão do alerta do método O-2 foi adotada uma resolução de 20 x 20 quadrantes. O vinhedo foi pulverizado nas semanas marcadas em azul. Esquema de cores segue o critério de decisão definido para a versão do O-2: *vermelho*, "pulverização imediata na semana do alerta"; *amarelo*, "aguardar o próximo alerta: havendo novo alerta amarelo, pulverizar"; *verde*, "não é necessária pulverização na semana corrente"; *laranja*, "pulverização imediata pelo 2º *amarelo* em sequência"; *azul*, "quadrantes protegidos por fungicida de 15 dias". * Para versão O-2, adotou-se o critério de que, no 2º alerta "amarelo" (intermediário) seguido em ao menos um quadrante qualquer, uma pulverização seria imposta ao vinhedo inteiro.

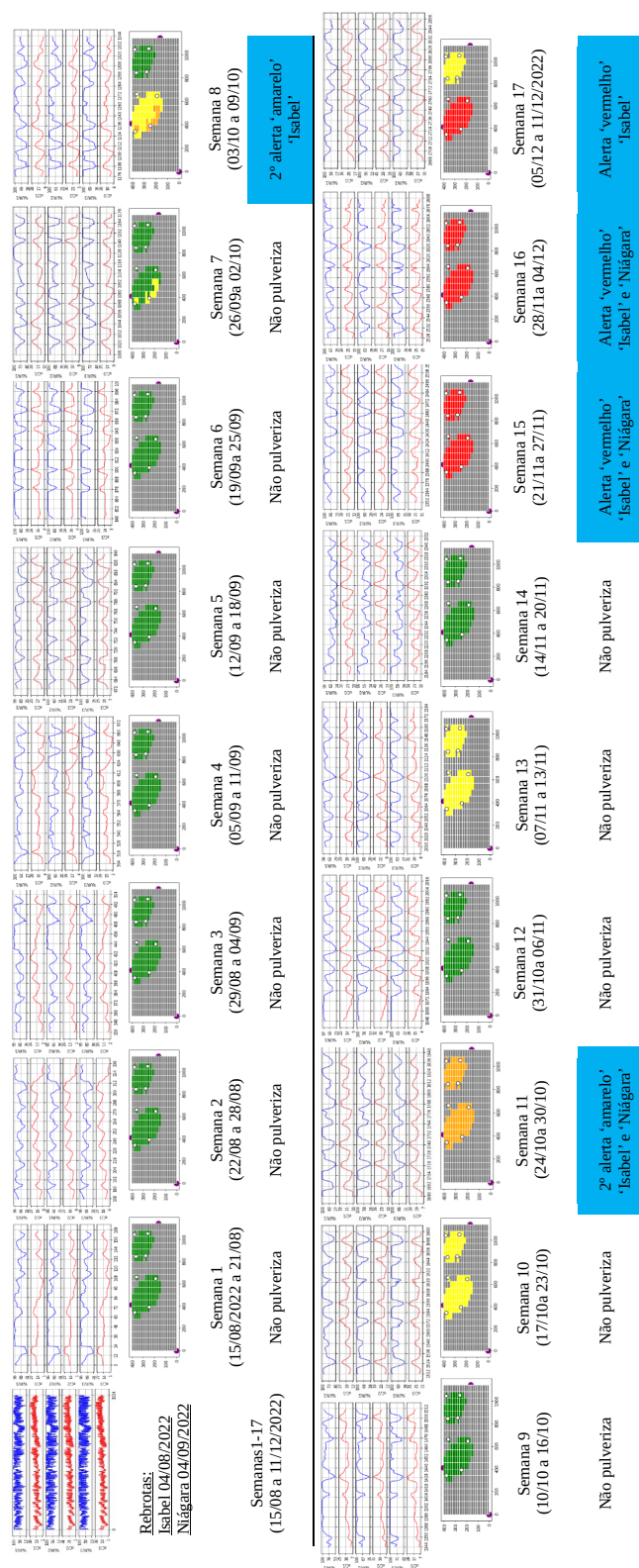


Figura 3. Primeira linha: perfis climáticos (°C, em vermelho, e % UR, em azul) e respectivos mapas temáticos (segunda linha) gerados pelo método MAHM3-O2 para o controle de mildio nos vinhedos 'Isabel' e 'Niagara rosada' da Embrapa Uva e Vinho, na safra 2022/2023. Para a emissão do alerta do método O-2 foi adotada uma resolução de 20 x 20 quadrantes. O vinhedo foi pulverizado nas semanas marcadas em azul. Esquema de cores segue o critério de decisão definido para a versão do O-2: *vermelho*, "pulverização imediata na semana do alerta"; *amarelo*, "aguardar o próximo alerta: havendo novo alerta amarelo, pulverizar"; *verde*, "não é necessária pulverização na semana corrente"; *laranja*, "pulverização imediata pelo 2º amarelo em sequência"; *azul*, "quadrantes protegidos por fungicida de 15 dias". * Para versão O-2, adotou-se o critério de que, no 2º alerta "amarelo" (intermediário) seguido em ao menos um quadrante qualquer, uma pulverização seria imposta ao vinhedo inteiro.

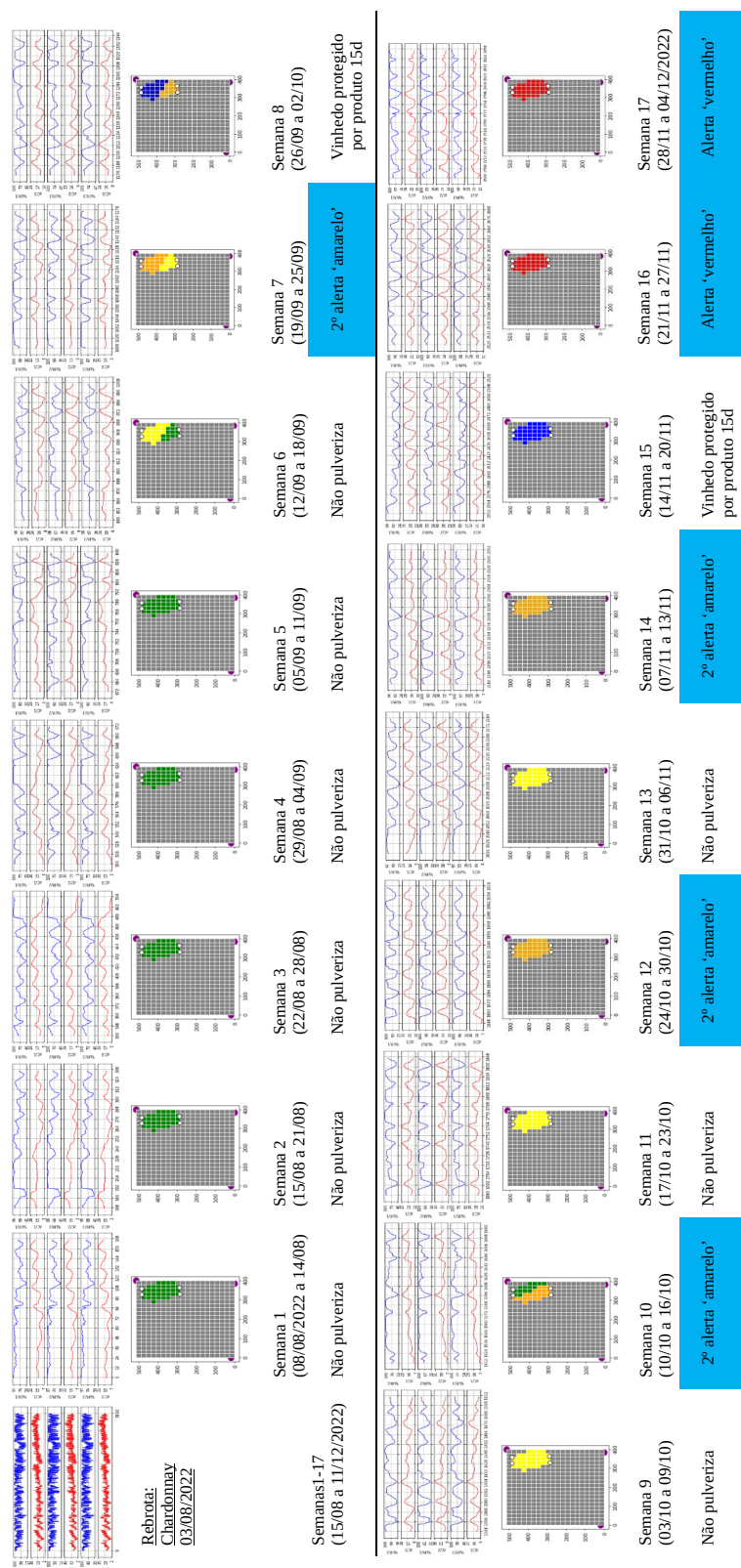


Figura 4. Primeira linha: perfis climáticos (°C, em vermelho, e % UR, em azul) e respectivos mapas temáticos (segunda linha) gerados pelo método MAHM3-O2 para o controle de míldio no vinhedo 'Chardonnay' de pinto Bandeira, RS, na safra 2022/2023. Para a emissão do alerta do método O-2 foi adotada uma resolução de 20 x 20 quadrantes. O vinhedo foi pulverizado nas semanas marcadas em azul. Esquema de cores segue o critério de decisão definido para a versão do O-2: *vermelho*, "pulverização imediata na semana do alerta"; *amarelo*, "aguardar o próximo alerta: havendo novo alerta amarelo, pulverizar"; *verde*, "não é necessária pulverização na semana corrente"; *laranja*, "pulverização imediata pelo 2º amarelo em sequência"; *azul*, "quadrantes protegidos por fungicida de 15 dias". * Para versão O-2, adotou-se o critério de que, no 2º alerta "amarelo" (intermediário) seguido em ao menos um quadrante qualquer, uma pulverização seria imposta ao vinhedo inteiro.

2020. Em Pinto Bandeira (2022), a triangulação foi disposta por três modelos LoRAIN (-29,122016, -51,445670; -29,126461, -51,449775; -29,126649, -51,445836) da versão 2021 do modelo.

Seguindo o padrão MAHM (Cavalcanti, 2021), o trabalho usou dados de umidade relativa (% UR) e temperatura média do ar (°C) obtidas por uma composição das três estações meteorológicas representativas das microrregiões onde a Embrapa Uva e Vinho e Pinto Bandeira estão inseridas, em triangulação. Para o controle de míldio em condições de campo, para cada área monitorada (Embrapa e Pinto Bandeira) e safra, cada canal de entrada de dados do MAHM recebeu um histórico de dados por diferentes fontes (MSs), fazendo, por isso, flexionar as saídas dos alertas associadas ao método O-2 submetido aos dados.

No presente trabalho, seguindo os experimentos de Cavalcanti (2021), adotou-se o critério de considerar o alerta mais grave referente à situação de maior ameaça de doença a ser aplicado em *todo* o vinhedo cadastrado. Portanto, nenhuma pulverização foi realizada em setores/quadrantes específicos, e o alerta mais pessimista foi levado em consideração para *todo* o vinhedo e as pulverizações foram feitas em toda a área produtiva sem desdobramentos de alerta no espaço.

Então, para a versão O-2, adotou-se o critério de que, no 2º alerta “amarelo” (intermediário) seguido em ao menos um quadrante qualquer, uma pulverização seria imposta ao vinhedo inteiro. As datas de rebrota e do início do monitoramento de todos os ensaios estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Datas de rebrota de todos os ensaios em condições de campo.

Vinhedo	Safra	Data aproximada de rebrota
Isabel Embrapa Uva e Vinho	2021/2022	17/8/2021
Niágara Embrapa Uva e Vinho	2021/2022	31/8/2021
Isabel Embrapa Uva e Vinho	2022/2023	15/8/2022
Niágara Embrapa Uva e Vinho	2022/2023	4/9/2022
Chardonnay Pinto Bandeira	2022/2023	3/8/2022

Esquema de cores segue o critério de decisão definido para a versão do O-1:

- Vermelho: pulverização imediata na semana do alerta.
- Amarelo: aguardar o próximo alerta.
- Novo alerta amarelo: pulverizar.
- Verde: não é necessário pulverização na semana corrente.
- Azul: significa “vinhedo bloqueado por produto de alcance de 15 dias”.
- Laranja: se refere a “2º amarelo em sequência - pulverizar imediatamente”.

As cores azul e laranja foram incorporadas nesta versão, MAHM3-O2.

Resultados e discussão

Estratégias modernas para o manejo de doenças de plantas na agricultura estão envolvendo o emprego de sistemas de previsão e alerta antecipado para aprimorar esquemas de pulverização e aperfeiçoar o controle químico. Esses sistemas dependem principalmente do rastreamento de fatores agroclimáticos (ambientais) capazes de gerar alertas para uma doença específica em uma determinada área de produção (Campbell; Madden, 1990). Os benefícios dessa estratégia impactam na aplicação racional de fungicida e maior eficiência de controle, acompanhada de uma redução na taxa de calda por hectare utilizada como encontrado por Cavalcanti (2021) e nos resultados abaixo apresentados.

Mesmo sendo a abordagem clássica, pesquisas recentes sobre sistemas de alerta se baseiam na utilização de dados meteorológicos, como temperatura e umidade, para prever a ocorrência e a gravidade de doenças de plantas. Ao coletar e analisar esses dados, os pesquisadores aplicam modelos precisos para, ainda em um contexto de Agricultura 4.0., auxiliar agricultores na tomada de decisões na redução de impacto de doenças (Maddalena et al., 2023).

Um estudo de Rossi et al. (2012) envolveu um sistema de alerta de míldio da videira com base em dados meteorológicos. Os pesquisadores usaram dados de temperatura, umidade relativa e precipitação para criar um modelo que simula o processo de infecção do patógeno do míldio. Este modelo permitiu prever o risco de surtos de míldio da videira e sugerir estratégias adequadas de manejo de doenças, como a aplicação de fungicidas, no momento certo para minimizar o impacto da doença. Segundo Rossi

et al. (2012), modelos de previsão estão em alinhamento com o Manejo Integrado de Pragas e Doenças (MIPD).

Outro estudo de Lu et al. (2020) teve como foco o desenvolvimento de um sistema de alerta para o oídio da videira por “redes de aprendizado bayesiano”. Ao analisar dados climáticos combinados com modelos de desenvolvimento do patógeno e sensibilidade do hospedeiro (planta), os pesquisadores conseguiram criar um modelo que previu com precisão a ocorrência do oídio. Esse sistema de alerta ajudou os gerentes de vinhedos na tomada de decisão sobre a frequência de aplicação de fungicidas e outras medidas de controle de doenças, reduzindo o impacto ambiental e econômico no Canadá.

O presente trabalho apresenta ensaios de duas safras subsequentes à primeira validação de um sistema de alerta sendo desenvolvido por captação de dados a partir de estações de IoT dispostas em triangulação, por Cavalcanti (2021). Nos ensaios aqui apresentados, foram utilizadas versões mais recentes deste sistema (o MAHM) e do método de alerta de míldio (Ozzy-2, O-2), em um conjunto apelidado por “MAHM3-O2”. Nessa versão, a triangulação define uma área total monitorada onde vinhedos internos a ela são cadastrados. Os critérios de cadastro dos vinhedos são as coordenadas de GPS de quatro pontos no perímetro (quadrilátero) externo que define o tal vinhedo, bem como o nível de sensibilidade da variedade ao *Plasmopara viticola*: (1) resistente; (2) medianamente suscetível; (3) suscetível. O MAHM3-O2 recebe essas informações por um pequeno *dataset* chamado *head*, que é lido e processado pelo O-2 antes da simulação. O quadrilátero referente à área monitorada seguiu o paradigma do MAHM, que é o resultado do rebatimento da triangulação feita com as MSs marcando o perímetro externo da área monitorada. Como nos ensaios das safras 2021/2022 e 2022/2023, tanto na Embrapa Uva e Vinho quanto em Pinto Bandeira foram usados três MSs, o *default* mínimo para o algoritmo conseguir rodar processamentos do *dataset*.

O resultado principal pode ser afirmado agora, neste parágrafo: em ambas as safras, os vinhedos ‘Isabel’ (*Vitis labrusca* x *Vitis vinifera*) e ‘Niágara rosada’ (*Vitis labrusca*) da Embrapa Uva e Vinho, bem como o vinhedo ‘Chardonnay’ (*Vitis vinifera*) em Pinto Bandeira, foram completamente protegidos do míldio da videira pelas pulverizações sugeridas

pelo MAHM3-O2 (Figuras 2, 3 e 4). Ou seja, em todas as avaliações realizadas quinzenalmente nas safras dos anos de 2021 e 2022, não foi verificado uma única mancha de óleo, ou qualquer sintoma associado ao míldio. Esses resultados repetem o que foi verificado em Cavalcanti (2021), também mediante redução significativa nas pulverizações, quando os vinhedos protegidos pelos alertas gerados pelo MAHM3-O2 foram comparados a calendários de pulverização convencionais baseados no *feeling* do administrador técnico, ou outro método.

Com as simulações da safra 2021/2022 (Figura 2), os dois vinhedos experimentais ‘Isabel’ e ‘Niágara rosada’ foram submetidos a um esquema de pulverização por alertas sugeridos. Comparativamente a outros vinhedos labrusca da região do Vale dos Vinhedos, o MAHM3-O2 produziu um esquema de controle que pôde reduzir entre 15 a 37% a quantidade de aplicações de fungicida, sem perda de proteção de ambos os vinhedos em todos os estádios fenológicos da estação (Figuras 2 e 5). Novamente, seguindo Cavalcanti (2021), adotou-se o critério de considerar o alerta mais grave referente à situação de maior ameaça de doença a ser aplicado em todo o vinhedo cadastrado. Portanto, em alertas onde o MAHM flexionou as saídas de recomendação de alerta por quadrante, por exemplo, nas semanas 6–10 da Figura 2, semanas 7–8 da Figura 3 e 6–10 da Figura 4, o “pior” caso foi considerado para todo o vinhedo. Explicando melhor, a recomendação mais pessimista dada ao menos um quadrante onde a mesma constasse, esta recomendação foi então estendida como o critério para o vinhedo inteiro. Assim, as aplicações por pulverizador conduzido por trator foram realizadas em todo o vinhedo, mesmo os com sinalização de alerta do MAHM em algumas de suas partes.

É conveniente lembrar que a aplicação potencial de um sistema de alerta baseado no georreferenciamento GPS do MAHM pode vir a servir como plano de referência para orientação automática de robôs com tecnologia de aplicação precisa de fungicidas, nos locais indicados e instantes certos (Cavalcanti, 2021). Assim, a limitação acima não impediu que o *timing* (instante) do alerta de doença do MAHM fosse testado para aplicação de fungicida em duas safras, considerando o vinhedo inteiro.

Para as simulações da safra 2022/2023 (Figura 3), os mesmos dois vinhedos experimentais ‘Isabel’ e ‘Niágara rosada’ das safras anteriores foram submetidos

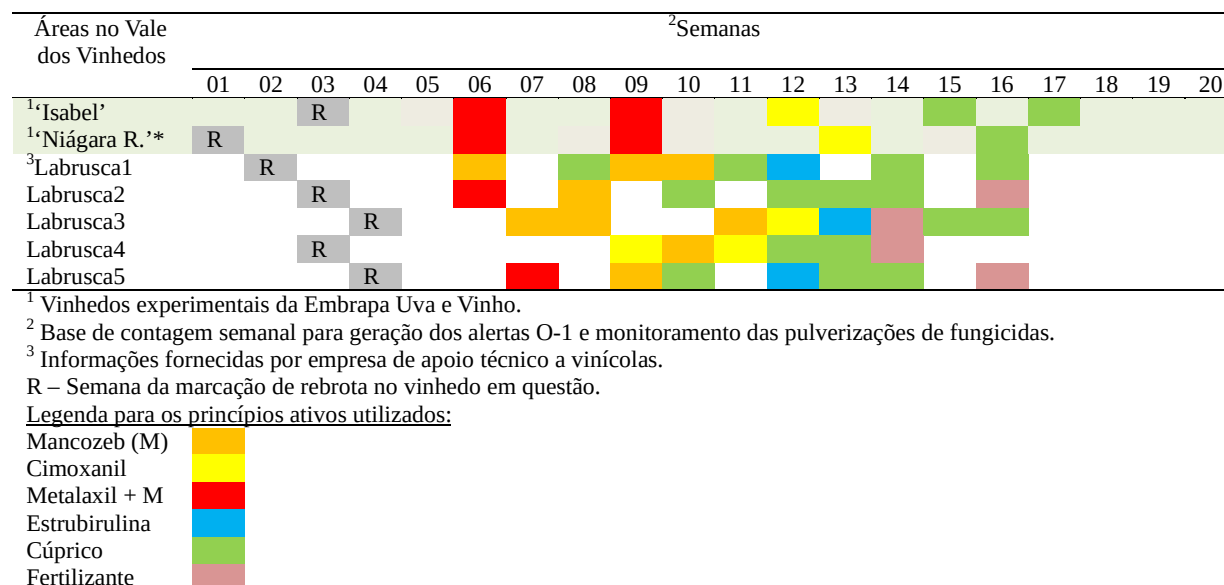


Figura 5. Comparativo entre esquemas utilizados em vinhedos de *Vitis labrusca* em Bento Gonçalves, RS (Vale dos Vinhedos) para proteção contra *Plasmopara viticola*, na safra 2021/2022.

a um esquema de pulverização por alertas sugeridos seguindo a mesma metodologia de observação e avaliação. Em comparação com outros vinhedos labrusca da região do Vale dos Vinhedos na mesma safra, o MAHM3-O2 produziu um esquema de controle que pôde reduzir entre 15 a 63% a quantidade de aplicações de fungicida, sem perda de proteção de ambos os vinhedos em todos os estádios fenológicos da estação (Figura 6).

Para as simulações da safra 2022/2023 (Figura 4) na área monitorada em Pinto Bandeira, RS, uma linha de vinhedo 'Chardonnay' foi usada para um esquema de pulverização por alertas sugeridos. Em comparação com outros vinhedos *vinifera* da mesma vinícola na mesma safra, o MAHM3-O2 produziu um esquema de controle que pôde reduzir entre 50 a 67% a quantidade de aplicações de fungicida, sem perda de proteção de ambos os vinhedos em todos os estádios fenológicos da estação (Figuras 4 e 7).

Os percentuais de redução seguindo alertas de pulverização sugeridos pelo MAHM3-O2, bem como em Cavalcanti (2021), estão em níveis compatíveis com resultados apresentados por outros sistemas de alerta, em outras situações de doença dentro e fora do patossistema míldio da videira.

A respeito dos testes do MAHM em condições de produção (campo), já contabilizando três safras em sequência, foi possível registrar uma observação importante: os perfis de microclima monitorados pelas MSs (temperatura e % UR do ar) possuem

assinaturas muito similares para fazer flexionar o mapa temático do MAHM, a despeito de terem sido observados alertas distintos em diferentes quadrantes no entorno das semanas 6–10 (Figuras 2, 3 e 4). Inclusive, esta evidência facilitou a aplicação do critério metodológico de considerar o “pior” alerta para todo o vinhedo, uma vez que a maioria dos alertas foi homogênea para os vinhedos experimentais cadastrados. Assim, o efeito do microclima foi marcadamente menor do que o inicialmente esperado, mesmo considerando um distanciamento entre as MSs dispostas na Embrapa Uva e Vinho entre 700 a 1100 m aproximadamente, abrangendo uma área monitorada de 0,45 km². A área monitorada para o ensaio com vinhedo único em Pinto Bandeira foi sensivelmente menor, de 0,20 km².

Da observação acima, vislumbra-se dois caminhos para a presente pesquisa, ambos promissores na entrega de adaptações MAHM para duas aplicações distintas: (1) uma versão que possa ser facilmente adaptada (porque já está escrita) para uso no monitoramento de míldio em microrregiões a partir e acima de 0,5 km². Provavelmente, esta versão deve sair de adaptação natural da atual (MAHM3-O2) sem alterações sobre o paradigma do sistema; apenas validando demarcações cada vez maiores de áreas monitoradas onde mais vinhedos pudessem ser cadastrados e monitorados. E, (2) versões a serem desenvolvidas por um refinamento do algoritmo MAHM considerando os índices de

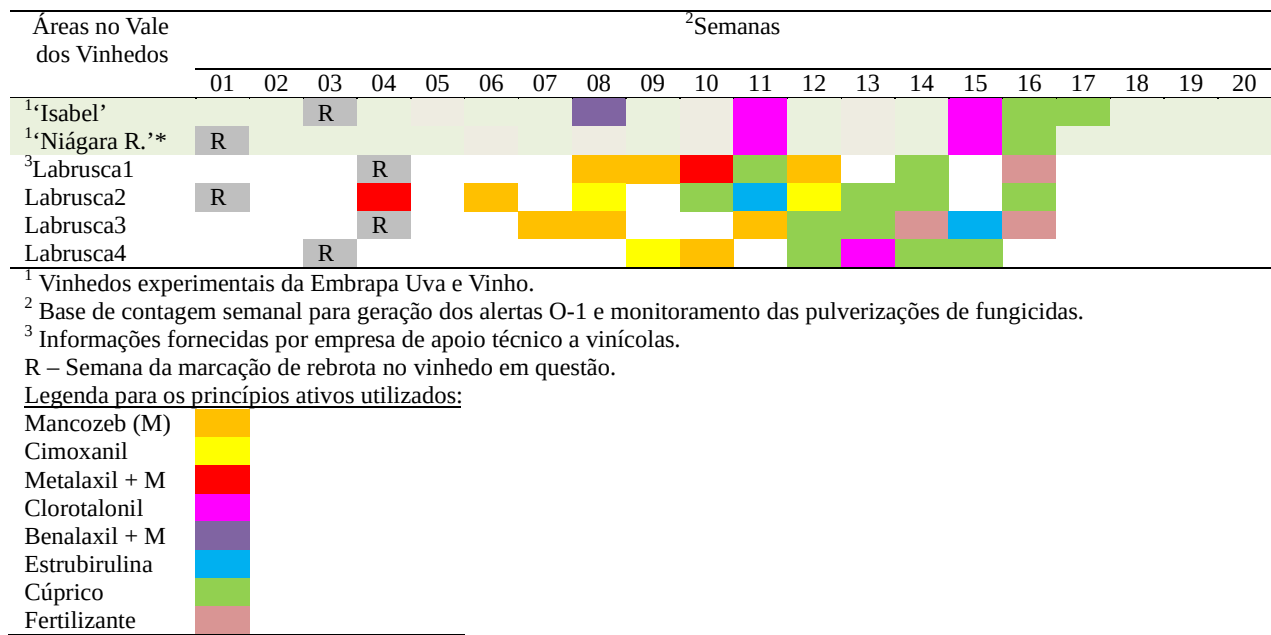


Figura 6. Comparativo entre esquemas utilizados em vinhedos de *Vitis labrusca* em Bento Gonçalves, RS (Vale dos Vinhedos) para proteção contra *Plasmopara viticola*, na safra 2022/2023.

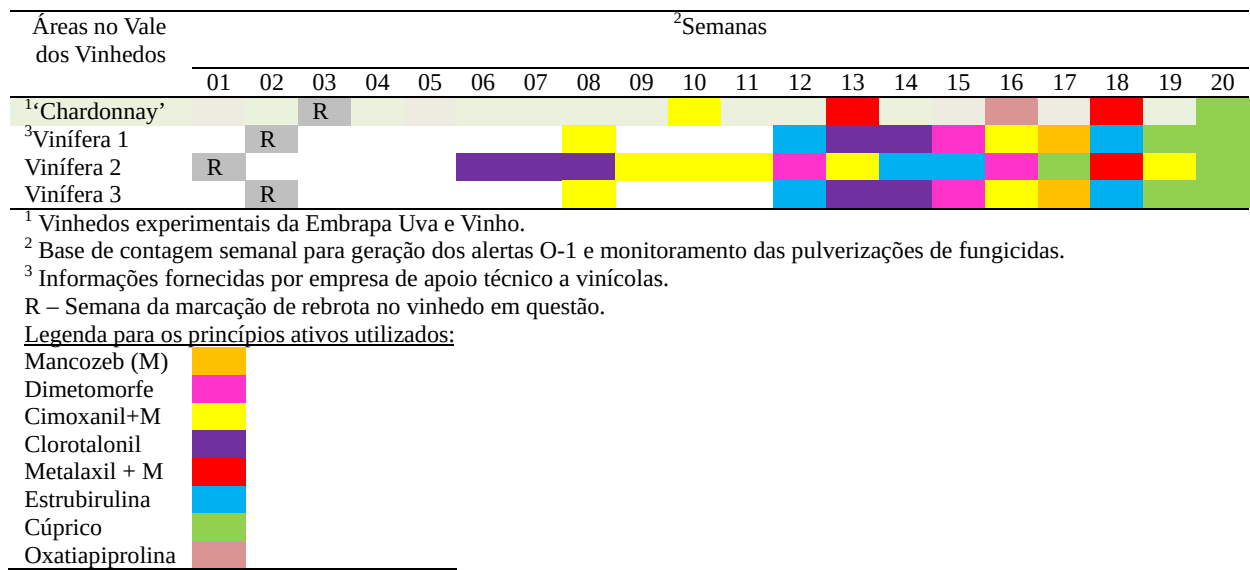


Figura 7. Comparativo entre esquemas utilizados em vinhedos de *Vitis vinifera* em Pinto Bandeira, RS (Vale dos Vinhedos) para proteção contra *Plasmopara viticola*, na safra 2022/2023.

favorabilidade em função de temperatura, % UR do ar e outras variáveis.

De fato, a inserção de mais sensores, como molhamento foliar, nas MSs da triangulação e livre adição de MSs (paradigma) poderia, em paralelo, resultar em incremento na sensibilidade do algoritmo aos perfis reais de microclima. Também, a adição de bibliotecas de aprendizado de máquina (*machine learning*, ML; *deep learning*, DL) e inteligência artificial (IA) no corpo do algoritmo está programada para obtenção de incrementos de precisão e exatidão nos mapas temáticos dessas versões “2” do MAHM. A incorporação do ML e da IA em sistemas de tomada de decisão envolvendo alertas de pulverização para o controle de doenças na agricultura é tendência orientada por pesquisas recentes sobre o tema, conforme Singh et al. (2016) e Chen et al. (2020).

O algoritmo Embrapa/MAHM, em perspectiva, tem aptidão para estabelecer-se como um modelo de processamento central em planos de automação e autonomia total (metas virtuais da chamada Agricultura 5.0) no controle de doenças policíclicas, que são aquelas dependentes de esquemas de pulverização de fungicidas (Cavalcanti, 2021). Isto é reforçado por Kamilaris et al. (2017) que destacou o potencial do uso de imagens de sensores terrestres, drones e satélites em combinação com algoritmos de aprendizado de máquina para detecção precoce e precisa de doenças de plantas. Essa abordagem não apenas permite que os agricultores tomem medidas preventivas, mas também facilita intervenções direcionadas, minimizando a perda de rendimento e reduzindo os impactos ambientais. Outro desenvolvimento crítico em sistemas de alerta de doenças de plantas é o uso da Internet das Coisas (IoT) e aplicativos de *smartphones* para monitoramento em tempo real e diagnóstico de doenças. Por exemplo, o aplicativo Plantix, desenvolvido pela PEAT GmbH, utiliza inteligência artificial e tecnologia de reconhecimento de imagem para identificar e diagnosticar doenças de plantas com base em fotos carregadas pelo usuário (Kamilaris et al., 2017). Esses aplicativos também podem fornecer aos agricultores informações valiosas sobre estratégias de manejo de doenças, como aplicação ideal de pesticidas e práticas culturais. Além disso, dispositivos IoT com sensores inteligentes podem ser implantados em campo para coletar dados ambientais, como temperatura, umidade e molhamento foliar, sendo empregados em modelos preditivos de doenças (Mezei et al., 2022).

Conclusões

- 1) Uma aplicação MAHM (versão MAHM3-O2) protegeu totalmente contra o míldio da videira em vinhedos (*labrusca* e *vinífera*) cadastrados em áreas monitoradas, demarcadas por três microestações de IoT nas safras 2021/2022 e 2022/2023, em duas microrregiões distintas.
- 2) A redução de aplicações de fungicida para garantir a proteção de labruscas variou de 15 a 37% na safra 2021/2022, 15 a 63% na safra 2022/2023 e, para a proteção do vinhedo ‘Chardonnay’ (*vinífera*) na safra 2022/2023, as reduções variaram entre 50 a 67%, em comparação com esquemas de proteção adotados por vinícolas.
- 3) Próximos ensaios do sistema devem ser conduzidos para desenvolver versão do MAHM contendo uma síntese de modelos de classificação em ML. Tais modelos poderão refinar a aplicação localizada de fungicidas em experimentos MAHM-dirigidos (pulverizar quadrantes), como também promover a calibração (aprendizagem) do algoritmo, incorporando eventuais falhas de cobertura, dentro de processos de validação e melhoria contínua nas versões.
- 4) Paralelamente, a linha de pesquisa enfatizando o paradigma MAHM de georreferenciamento deve ser continuada no desenvolvimento de versões que incrementem precisão e exatidão, seja por estratégia de *software*: refinar equações de favorabilidade e incorporação de bibliotecas de AM e ML no algoritmo; seja por incremento de *hardware*: adição de novos sensores às microestações de IoT que fazem suporte da rede em triangulação (paradigma). A continuidade da presente abordagem vislumbra futuras aplicações de fungicida por robôs de pulverização, após pesquisa subsequente de validação.

Referências

- AL-SADDIK, H.; LAYBROS, A.; BILLIOT, B.; COINTAULT, F. Using image texture and spectral reflectance analysis to detect yellowness and Esca in grapevines at leaf-level. *Remote Sensing*, v. 10, n. 4, p. 618, April 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs10040618>.
- AMPESE, L. C.; LOBATO, A.; CAVALCANTI, F. R. ROCKET: ferramenta para validar a detecção visual de um avaliador. In: ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 15., 2017; ENCONTRO DE PÓS-GRADUANDOS

- DA EMBRAPA UVA E VINHO, 11., 2017, Bento Gonçalves. **Resumos...** Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho, 2017. p. 56. (Embrapa Uva e Vinho. Documentos, 103). Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/162552/1/Anais-15IC-2017-56.pdf>. Acesso em: 22 mar. 2023.
- AZEVEDO, L. A. S. de. **Manual de quantificação de doenças de plantas**. São Paulo: Novartis Biociências, 1998.
- CAFFI, T.; ROSSI, V.; BUGIANI, R. Evaluation of a warning system for controlling primary infections of grapevine downy mildew. **Plant Disease**, v. 94, n. 6, p. 709-716, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1094/PDIS-94-6-0709>.
- CAMPBELL, C. L.; MADDEN, L. V. Introduction to plant disease epidemiology. New York: Wiley-Interscience, 1990. 532 p.
- CAVALCANTI, F. R.; CASSUBA, K. F.; FIORAVANÇO, J. C. **Avaliação de produtos biológicos e um indutor de resistência no controle do míldio da videira**. Bento Gonçalves, RS: Embrapa Uva e Vinho, agosto 2020. 24 p. (Embrapa Uva e Vinho. Circular Técnica 149). Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1124483>. Acesso em: 22 mar. 2023.
- CAVALCANTI, F. R. **Algoritmo (MAHM) para alerta georreferenciado de doença em redes de sensoriamento IoT de microclima: calibração e teste de um método para míldio, em dois vinhedos**. Bento Gonçalves, RS: Embrapa Uva e Vinho, agosto 2021. 25 p. (Embrapa Uva e Vinho. Circular Técnica, 124). Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1134000>. Acesso em: 8 ago. 2023.
- CHEN, M.; BRUN, F.; RAYNAL, M.; MAKOWSKI, D. Forecasting severe grape downy mildew attacks using machine learning. **PLoS ONE**, v. 15, n. 3. e0230254, March 2020. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0230254>.
- CZERMAINSKI, A. B. C. Generalização de um índice de intensidade de infecção em experimentos de avaliação de doenças em plantas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, n. 9, p. 1545-1555, set. 1999. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1124527>. Acesso em: 22 mar. 2023.
- KAMILARIS, A.; KARTAKOULLIS, A.; PRENAFETA-BOLDÚ, F. X. A review on the practice of big data analysis in agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 143, p. 23-37, Dec. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.09.037>.
- LIU, Y.; HE, F. Incorporating the disease triangle framework for testing the effect of soil-borne pathogens on tree species diversity. **Functional Ecology**, v. 33, n. 7, p. 1211-1222, July 2019. DOI: [10.1111/1365-2435.13345](https://doi.org/10.1111/1365-2435.13345)
- LU, W.; NEWLANDS, N. K.; CARISSE, O.; ATKINSON, D. E.; CANNON, A. J. Disease risk forecasting with bayesian learning networks: application to grape powdery mildew (*Erysiphe necator*) in vineyards. **Agronomy**, v. 10, n. 5, p. 622, April 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy10050622>.
- MADDALENA, G.; FASSOLO, E. M.; BIANCO, P. A.; TOFFOLATTI, S. L. Disease forecasting for the rational management of grapevine mildews in the Chianti Bio-District (Tuscany). **Plants**, v. 12, n. 2, p. 285, Jan. 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants12020285>.
- MEZEI, I.; LUKIC, M.; BERBAKOV, L.; PAVKOVIC, B.; RADOVANOCIC, B. Grapevine downy mildew warning system based on NB-IoT and energy harvesting technology. **Electronics**, v. 11, n. 3, p. 356, Jan. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics11030356>.
- PAVAN, W.; FRAISSE, C. W.; PERES, N. A. Development of a web-based disease forecasting system for strawberries. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 75, n. 1, p. 169-175, Jan. 2011. DOI: [10.1016/j.compag.2010.10.013](https://doi.org/10.1016/j.compag.2010.10.013).
- ROSSI, V.; CAFFI, T.; SALINARI, F. Helping farmers face the increasing complexity of decision-making for crop protection. **Phytopathologia Mediterranea**, v. 51, n. 3, p. 457-479, 2012. DOI: https://doi.org/10.14601/Phytopathol_Mediterr-11038.
- SHAW, D. S.; HONEYCHURCH, K. C. Nenosensor applications in plant Science. **Biosensors**, v. 12, n. 9, p. 675, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/bios12090675>.
- SINGH, A.; GANAPATHYSUBRAMANIAN, B.; SINGH, A. K.; SARKAR, S. Machine learning for high-throughput stress phenotyping in plants. **Trends in Plant Science**, v. 21, n. 2, p. 110-124, Feb. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2015.10.015>
- VELASQUEZ-CAMACHO, L.; OTERO, M.; BASILE, B.; PIJUAN, J. Current trends and perspectives on predictive models for mildew diseases in vineyards. **Microorganisms**, v. 11, n. 1, p. 73, Dec. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms11010073>.
- WRZESIÉN, M.; TREDER, W.; KLAMKOWSKI, K.; RUDNICKI, W. R. Prediction of the apple scab using machine learning and simple weather stations. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 161, p. 252-259, June 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.09.026>.



MINISTÉRIO DA
AGRICULTURA E
PECUÁRIA