

Caracterização de doenças fúngicas de *Vitis vinifera* por radiometria espectral

Characterization by spectral radiometry of fungal diseases of *Vitis vinifera*

Pâmela Aude Pithan¹, Jorge Ricardo Ducati², Lucas da Ressurreição Garrido³, Diniz Carvalho de Arruda⁴, Rosemary Hoff⁵, Adriane Brill Thum⁶

¹ Mestre, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre (RS), Brasil, pamelapithann@gmail.com

² Doutor, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre (RS), Brasil, jorge.ducati@ufrgs.br

³ Doutor, Embrapa Uva e Vinho, Bento Gonçalves (RS), Brasil, lucas.garrido@embrapa.br

⁴ Doutor, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre (RS), Brasil, dinizcarvalho88@hotmail.com

⁵ Doutora, Embrapa Uva e Vinho, Bento Gonçalves (RS), Brasil, rose.hoff@embrapa.br

⁶ Doutora, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre (RS), Brasil, adrianebt@unisinis.br

RESUMO

Este estudo teve como objetivo detectar alterações espectrais de folhas de videira (*Vitis vinifera* cv. Cabernet Sauvignon) com sintomas iniciais de míldio (*Plasmopara viticola*), oídio (*Uncinula necator*), pé-preto (*Dactylonectria macrodidyma*) e doença de Petri (*Phaeoacremonium* spp.). Plantas foram inoculadas com os patógenos e medida a reflectância, e a análise estatística revelou diferenças entre espectros de plantas sintomáticas e de testemunhas. Com isso, os espectros de reflectância foram investigados para cada doença. Um conjunto de limiares, razões de reflectância em comprimentos de onda selecionados (nm), foram: R443/R496, R443/R573, R443/R695, R443/R1900, R496/R573, R496/R695, R516/R1900 e R1900/R2435. Os espectros de plantas sintomáticas apresentaram alterações de forma de até 20% em relação às plantas saudáveis. Esses resultados são potencialmente úteis para o desenvolvimento de dispositivos de baixo custo para uso em campo, fornecendo detecção de doenças em tempo real para avaliação precoce do estado de saúde do vinhedo.

Palavras-chave: reflectância da videira; *Plasmopara viticola*; *Uncinula necator*; *Dactylonectria macrodidyma*; *Phaeoacremonium* spp.

ABSTRACT

The objective of this study was to detect spectral alterations in grapevine leaves (*Vitis vinifera* cv. Cabernet Sauvignon), with initial symptoms of downy mildew (*Plasmopara viticola*), powdery mildew (*Uncinula necator*), blackfoot (*Dactylonectria macrodidyma*) and Petri disease (*Phaeoacremonium* spp.). Plants were inoculated with the pathogens and their reflectance was measured. The statistical analysis revealed differences between spectra of symptomatic and control plants and thus, the reflectance spectra were investigated for each disease. A set of threshold, reflectance ratios at selected wavelengths (nm) were: R443/R496, R443/R573, R443/R695, R443/R1900, R496/R573, R496/R695, R516/R1900 and R1900/R2435. The spectra of symptomatic plants showed shape changes of up to 20% compared to healthy plants. These results are potentially useful for developing low-cost devices for field use, providing real-time disease detection for early assessment of vineyard health.

Keywords: grapevine reflectance; *Plasmopara viticola*; *Uncinula necator*; *Dactylonectria macrodidyma*; *Phaeoacremonium* spp.

<https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000040>

 Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

1 INTRODUÇÃO

As doenças bióticas induzem alterações perceptíveis no espectro de reflectância das plantas, principalmente devido a alterações na clorofila e no teor de água, entre outros fatores. A detecção dessas alterações pode fornecer informações úteis para o desenvolvimento de métodos e técnicas voltadas à prevenção de doenças. A espectroscopia de reflectância e transmitância visível e infravermelho próximo (VNIR) foi aplicada para avaliar a condição de estresse de plantas infectadas por patógenos como o fungo *Penicillium digitatum* em frutas cítricas (Lorente et al., 2015). Investigando macieiras, Delalieux et al. (2007) identificaram as regiões espectrais mais importantes para separar plantas sadias de plantas com estresse causado por *Venturia inaequalis*, enquanto Graeff et al. (2006), em um estudo em plantas de trigo, indicaram que a detecção de doenças e discriminação de oídio por meio de medidas de reflectância podem ser feitas por faixas de comprimento de onda específicas. Naidu et al. (2009) e Junges et al. (2018) relataram efeitos nos espectros de reflectância observados principalmente no VNIR, em videiras infectadas pelo vírus do enrolamento da folha. De Bei et al. (2011) demonstraram que o NIR pode ser usado como um método simples e rápido para detectar o estado hídrico da videira, e Beghi et al. (2017) investigaram a aplicabilidade da espectroscopia VNIR para avaliação rápida do *status* fitossanitário da uva.

No entanto, descrições detalhadas de quais mudanças espectrais ocorrem e aplicações desse conhecimento que podem beneficiar os processos produtivos ainda não foram relatadas. Geralmente, a detecção de uma doença ocorre quando a doença já atingiu uma parte relativamente grande da parcela plantada, dificultando a aplicação de medidas de proteção. A detecção precoce pode induzir ações preventivas, reduzindo perdas e custos, além de trazer benefícios ambientais por meio da redução de pesticidas (Gebbers; Adamchuk, 2010; Komárek et al., 2010; Mahlein, 2016). Métodos foram desenvolvidos para detectar doenças de plantas com base em análise química ou em inspeção visual (Sankaran et al., 2010), mas, nesses casos, as doenças já estão bem desenvolvidas. A taxa de incidência e a importância de determinadas doenças fúngicas em videiras variam de ano para ano, dependendo da variedade de uvas, da região, das práticas agrícolas e das condições meteorológicas (Jackson, 2016; Freire et al., 2017). As doenças fúngicas têm uma alta taxa de incidência em regiões vitícolas sob certas condições ambientais, sendo a alta umidade uma das mais relevantes (Keller, 2020). Nas regiões vitícolas do Sul do Brasil, períodos de altas temperaturas e umidade são frequentes durante a estação vegetativa, e surtos de

doenças fúngicas são comuns em vinhedos desprotegidos (Camargo et al., 2008).

No contexto da agricultura de precisão, a detecção precoce de doenças vegetais através da espectroscopia de reflectância pode transformar a gestão agrícola. Sensores instalados em drones ou dispositivos móveis permitem a coleta contínua de dados em tempo real, com fornecimento de informações detalhadas sobre a saúde das plantas em áreas extensas, possibilitando a aplicação precisa e localizada de fungicidas e outros tratamentos, otimizando recursos e reduzindo o impacto ambiental.

Abordando esses problemas, presentemente este estudo relata uma pesquisa em que foram selecionadas quatro doenças: duas que atacam todas as partes verdes da videira, e duas que atacam troncos e raízes, resultando em grandes perdas. O míldio (*Plasmopara viticola*), a principal doença da videira no Brasil, penetra nos tecidos pelos estômatos muito rapidamente e, sem um controle químico adequado, em períodos de chuvas ou alta umidade, pode destruir toda a parte vegetativa e reprodutiva da videira. O oídio (*Uncinula necator*) é outro patógeno importante em quase todas as regiões vitícolas, sendo mais grave em anos mais secos. A doença de Petri (*Phaeoacremonium* spp.), induzida pelo estresse hídrico, infecta os vasos condutores e também está envolvida no declínio e morte de plantas. A doença do pé-preto (*Dactylonectria macrodidyma*), que se desenvolve em condições de solos mal drenados e argilosos, afeta tipicamente as raízes de videiras jovens (Jackson, 2008; Pertot et al., 2017).

Considerando essas doenças, o objetivo deste estudo foi a aplicação de medidas de reflectância espectral ao mapeamento de alterações espectrais de folhas de videira induzidas pelas doenças citadas, gerando índices para sua detecção. Os resultados foram gerados pelo uso de espectrorradiômetro em plantas sintomáticas e sadias de *Vitis vinifera*, var. Cabernet Sauvignon, observado *in vivo* em casa de vegetação.

2 MATERIAL E MÉTODO

As amostras de plantas sadias e infectadas de *Vitis vinifera*, var. Cabernet Sauvignon, foram preparadas no Laboratório de Fitopatologia da Embrapa Uva e Vinho, unidade da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) localizada em Bento Gonçalves, Rio Grande do Sul, Brasil, onde está disponível uma coleção de fungos filamentosos.

Patógenos isolados de *Dactylonectria macrodidyma* e de *Phaeoacremonium* spp., da coleção de fungos fitopatogênicos (SISGEN N° A99F2F2), foram replicados em meio de crescimento BDA (batata-dextrose-

-agar), e mantidos a 24 °C e fotoperíodo de 12 horas durante 20 dias. A suspensão de inóculo resultante da raspagem dos conídios produzidos foi ajustada para a concentração de 10⁶ esporos/ml por meio de hemocitômetro, e ambos patógenos foram inoculados por imersão de raízes previamente cortadas na suspensão de inóculo durante 15 minutos, sendo preparadas dez plantas para cada patógeno, sendo também preparado um lote único de dez plantas de controle (sadias) com raízes cortadas imersas em água destilada e esterilizada. Foi dado um período de 13 dias entre a inoculação e as medições espectrais.

Os inóculos de *Plasmopara viticola* foram obtidos a partir da coleta de folhas infectadas de um vinhedo de Cabernet Sauvignon da região da Serra Gaúcha, sendo as folhas mantidas em câmara úmida por 48 horas para que os esporângios fossem coletados. A suspensão de inóculos foi ajustada para 10⁵ esporângios/ml e pulverizada em 10 plantas. Este lote, com o lote de 10 plantas controle, foi incubado a 24 °C e umidade relativa de 92% durante oito dias com fotoperíodo de 12 horas, para poder ser medido espectralmente. O inóculo de *Uncinula necator* ocorreu espontaneamente em folhas de videiras da variedade dentro de casa de vegetação. Dez plantas foram preparadas e, neste caso, 10 plantas controle foram pulverizadas com fungicida do grupo triazol para evitar a infecção pelo patógeno. As plantas com sintomas de oídio permaneceram na casa de vegetação até as medições.

O experimento teve blocos casualizados com 10 repetições com os seguintes tratamentos: a) plantas inoculadas com *P. viticola*; b) controle sem inoculação de *P. viticola*; c) plantas inoculadas com *U. necator*; d) controle sem infecção por *U. necator*; e) plantas inoculadas com *D. macrodidyma*; f) plantas infectadas com *Phaeoacremonium* spp.; e g) controles para patógenos de raízes. No total, 70 plantas estavam disponíveis para medições.

Os procedimentos descritos foram feitos para a campanha de 2017, repetindo-se com novas plantas em 2018, sendo que para o míldio foram medidas cinco plantas de controle.

As medidas espectroscópicas foram realizadas por espectrorradiômetro FieldSpec® 3, faixa espectral entre 350 nm e 2.500 nm, intervalos de valores de reflectância entre 0,0 e 1,0 nm (Malvern Panalytical, 2020). A calibração foi feita por placa de referência interna Spectralon® (Labsphere, Inc., North Sutton, NH, EUA), e as medições por sonda Leaf Clip com fonte de luz halógena interna.

Cada lote de plantas foi formado por 10 vasos por doença, sendo feitas leituras de três folhas localizadas na parte central da planta e previamente mar-

cadas. Em cada folha foram feitas quatro medidas, sempre na face adaxial, evitando o sistema vascular. Todas as plantas eram bastante jovens e tinham cerca de seis ou sete folhas. Foi medido um lote completo de plantas assintomáticas e depois o lote de plantas sintomáticas. Para as amostras de oídio em 2017, as medições foram realizadas em duas fases: a primeira com a doença em estágios iniciais (oídio 1), e seis dias após com a doença em estágio avançado (oídio 2). Em 2018, apenas a primeira fase foi medida. As plantas com os outros patógenos foram medidas apenas no estágio inicial.

Na maioria dos casos, a região espectral no ultravioleta (350 nm - 400 nm) apresentou muito ruído, dificultando a detecção e análise de características espectrais, não sendo considerada em análise dos espectros. Para cada folha, foi calculada uma média dos quatro espectros, e para cada planta foi produzida uma média para as três folhas, sendo todos os espectros normalizados. O método desenvolvido neste estudo foi baseado na equação a seguir, em que $R\lambda$ é a reflectância em comprimento de onda (λ) e o denominador da equação é a área ou integral de um espectro. O espectro normalizado teria para cada λ um novo valor $R'\lambda$ (Equação 1).

$$R'\lambda = \frac{R\lambda}{\sum_{n=1}^n R_{400} + R_{401} + \dots + R_{2500}} \quad (1)$$

Tal normalização, apresentada na equação acima, altera apenas a escala vertical de um espectro, com a finalidade de auxiliar na inspeção visual dos espectros a serem comparados, facilitando a detecção de diferenças entre eles. No entanto, para a maioria das operações, a normalização não foi necessária. O banco de dados teve 90 espectros na primeira fase de medições (2017) e 65 espectros na segunda fase de plantas de estufa (2018).

A alteração espectral em plantas de videiras pode ser sutil, e métodos apropriados para detectar essas alterações devem ser desenvolvidos. A sutileza das mudanças espectrais por doenças na vegetação e a dificuldade em sua detecção têm sido relatadas (Delalieux et al., 2007; Ettabaa; Salem, 2018). A detecção de tais características é possível quando os espectros analisados têm uma alta relação sinal-ruído (SNR). No caso estudado, foi possível estimar a qualidade das aquisições de reflectância por meio de uma avaliação SNR. O fabricante do espectrorradiômetro cita três comprimentos de onda como referência para ruído, um para cada sensor dentro do aparelho (Malvern Panalytical, 2020), sendo 700 nm (VNIR), 1.400 nm

(SWIR1) e 2.100 nm (SWIR2). No entanto, para os espectros de vegetação medidos, esses comprimentos de onda estão próximos de características espectrais, como as depressões de *red edge* e absorção de água. O SNR foi avaliado nos comprimentos de onda próximos dos citados pelo fabricante (620 nm, 1.150 nm e 2.200 nm). Além disso, foram derivados valores de reflectância que são a média para uma planta inteira, calculada sobre três folhas, e como uma segunda avaliação de qualidade, foram derivados os desvios-padrão para essas médias.

Os valores de reflectância dos espectros das folhas de controle (sadias) foram divididos pela reflectância dos espectros das folhas sintomáticas em cada comprimento de onda ao longo de todo o domínio espectral, gerando 'relação de espectro', uma imagem relacionada ao espectro com um eixo vertical adimensional. Supondo que as alterações espectrais em plantas sintomáticas sejam sutis, ambos espectros tendem a ser quase iguais, e o quociente resultante tende a apresentar valores quase iguais à unidade ao longo de todo o domínio do comprimento de onda. Uma análise de várias razões de espectro geradas por vários pares de espectros, observando comprimentos de onda com quocientes não unitários consistentes, revelaria as regiões espectrais onde os espectros de plantas sintomáticas eram diferentes dos espectros de plantas saudáveis; assumindo que as doenças provocariam essas alterações espectrais. A análise sistemática produziu uma lista das principais alterações espectrais em torno de oito comprimentos de onda.

Investigou-se o impacto espectral relativo de cada doença, expresso pela razão entre a intensidade nos oito comprimentos de onda, tomados dois a dois, resultando em 28 combinações pares de comprimentos de onda, ou proporções, para qualquer espectro medido. Obteve-se para cada doença 10 plantas individuais, portanto, 10 espectros, e assim para cada doença, tendo para um determinado par de comprimentos de onda, 10 valores de razão, assumindo estarem distribuídos de forma gaussiana. Como método analítico, foram projetadas curvas gaussianas com 50 pontos que se ajustaram à distribuição das 10 razões de reflectância. Para cada uma das 28 razões, foram traçadas as curvas para cada doença, procurando os casos com melhor separação entre as doenças. Foi selecionado um conjunto de oito razões das quais as doenças eram mais bem separadas por meio de limites característicos de cada doença.

A partir dos comprimentos de onda selecionados, realizou-se a análise discriminante canônica no programa estatístico SPSS, método Stepwise, para os grupos de plantas com doenças e também para os grupos

de plantas de doenças junto com suas testemunhas. Como os grupos de testemunhas foram desenvolvidos associados às suas respectivas doenças, seria possível que fisiológica e espectralmente os grupos de testemunhas teriam relações entre si. Por esse motivo, uma das análises foi realizada sem o conjunto de testemunhas, a fim de dar maior precisão aos resultados.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A primeira avaliação da qualidade das medidas foi a relação sinal-ruído (SNR). Para uma medição original de folha única, proveniente de quatro aquisições consecutivas, os valores típicos de SNR foram 480 em $\lambda = 620$ nm, 720 em $\lambda = 1.150$ nm e 1.000 em $\lambda = 2.200$ nm. Tais valores são indicadores de medições de alta qualidade (Schroeder, 1999).

Com relação aos desvios-padrão de uma medição de planta, com médias realizadas em três folhas, os valores típicos de reflectância normalizada para qualquer planta foram 6×10^{-6} , 5×10^{-6} e 8×10^{-6} nos três comprimentos de onda mencionados. Esses valores são cerca de duas ordens de magnitude menores do que a faixa de variação dos valores de reflectância (normalizados) mostrados na Figura 1, onde são exibidas as diferenças espectrais devido aos efeitos do patógeno. As próprias diferenças estão na faixa de 10^{-5} na Figura 1. Portanto, como os desvios-padrão em geral são cerca de 10 vezes menores do que as diferenças exibidas, concluiu-se que as diferenças espectrais entre as doenças estudadas foram consistentes.

As razões entre os espectros de reflectância de folhas de plantas doentes e plantas de controle saudáveis são apresentadas na Figura 2. Observam-se que as alterações espectrais devido a diferentes doenças registram quase nos mesmos comprimentos de onda, por exemplo, o míldio e o pé-preto induzem mudanças em um espectro normal nos mesmos locais. Nesses casos, a observação de um espectro alterado pode ser útil, indicando que a planta é portadora de uma doença, mas não exatamente qual doença. Assumiu-se a hipótese de que as alterações metabólicas induzidas na planta por doença são características, e que as alterações espectrais têm magnitudes típicas de cada doença. Dessa forma, um espectro de uma planta sintomática, em relação a um espectro de uma planta sadia, apresentaria não apenas alterações espectrais em determinados comprimentos de onda, mas também as magnitudes dessas alterações seriam características de cada doença.

A partir da inspeção da Figura 2, foram selecionados oito comprimentos de onda em que as separações entre doenças foram mais evidentes, sendo os seguin-

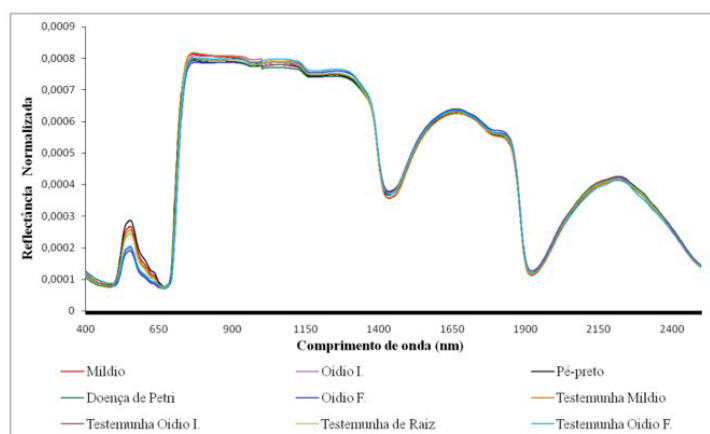


Figura 1. Espectro da reflectância média normalizada dos patógenos e dos controles. Conforme Pithan et al. (2021).

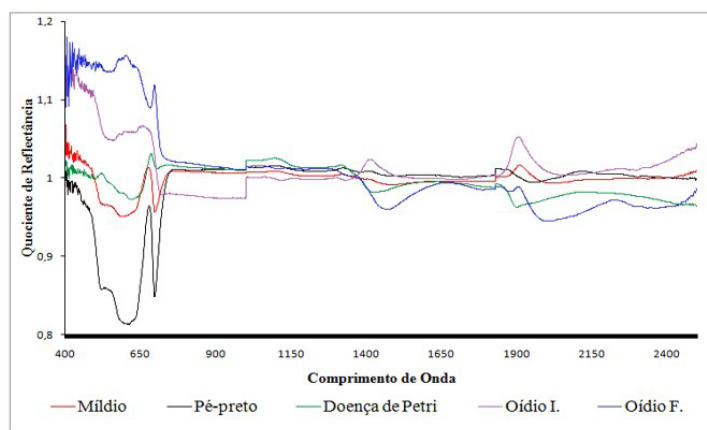


Figura 2. Razões de reflectância entre plantas sintomáticas e seus respectivos controles ao longo dos comprimentos de onda medidos. Os oito comprimentos de onda selecionados como marcadores de alterações espectrais induzidas por doenças são mostrados. Conforme Pithan et al. (2021).

tes: no visível, em 443, 496, 516, 573 e 695 nm, e notadamente alguns estavam próximos às absorções de clorofila (450 e 670 nm), sugerindo que os efeitos das doenças afetam a assimilação de clorofila. No infravermelho próximo, os comprimentos de onda selecionados foram em 1.420, 1.900 e 2.435 nm, tendo proximidade com as características de absorção de água nesses comprimentos de onda, sugerindo que o metabolismo da água também poderia ser afetado.

Os comprimentos de onda selecionados foram utilizados nas análises discriminantes cujos resultados para 2017 são apresentados nas Tabelas 1 e 2. Na Tabela 1, está o resultado da análise discriminante para os cinco grupos sintomáticos, com acurácia geral de 94,3%. Alguma confusão apareceu entre as doenças que afetam as raízes. Na Tabela 2, estão os resultados da análise de todos os oito grupos, ou seja, os cinco grupos sintomáticos e os três grupos controle, com acurácia de 85,7%. A partir da Tabela 2, observa-se que os grupos de controle não apenas estão separados, mas também revelam alguma confusão com

seus respectivos grupos sintomáticos. Essa associação possivelmente decorre do fato de que ambos os grupos iniciaram nas mesmas condições; para outro par controle-doença, envolvendo outra doença, as condições iniciais foram diferentes. Este efeito sugere que dados de diferentes condições iniciais, sejam estações ou locais, deveriam ter suas próprias medidas de controle. Além disso, não apenas considerando os descritores espectrais internos de uma planta sintomática para o diagnóstico, mas uma medida de calibração de uma planta saudável sendo associada.

Assumindo que uma determinada doença imprime uma forma de curva espectral, uma maneira possível de descrevê-la seria usando descritores internos ao espectro, como razões entre os valores de reflectância nos comprimentos de onda característicos. Dessa forma, cada doença teria um conjunto de razões, derivado e tendo a vantagem de ser para cada espectro, ou seja, a informação que revela a doença o espectro de uma planta sintomática. Em última análise, seria possível derivar para cada doença um conjunto de

Tabela 1. Matriz de confusão (%) resultante da classificação dos valores de reflectância foliar dos oito comprimentos de onda selecionados para melhor separação entre as doenças fúngicas analisadas (exceto controles). 1. míldio; 2. pé-preto; 3. doença de Petri 1; 4. oídio 1; 5. oídio 2. resultados de 2017. Conforme Pithan et al. (2021).

Doença	1	2	3	4	5	Σ
1	100	0	0	0	0	100
2	0	85.7	14.3	0	0	100
3	0	14.3	85.7	0	0	100
4	0	0	0	100	0	100
5	0	0	0	0	100	100

Tabela 2. Matriz de confusão (%) resultante da classificação dos valores de reflectância foliar dos oito comprimentos de onda selecionados para melhor separação entre as doenças fúngicas analisadas, incluindo seus controles. 1. míldio; 2. controle do míldio; 3. pé-preto; 4. doença de Petri; 5. controle de raízes; 6. oídio 1; 7. controle de oídio 1; 8. oídio 2; 9. controle de oídio 2. Resultados de 2017. Conforme Pithan et al. (2021).

Doença	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Σ
1	85.7	0	0	14.3	0	0	0	0	0	100
2	14.3	85.7	0	0	0	0	0	0	0	100
3	0	0	71.4	14.3	14.3	0	0	0	0	100
4	0	0	0	100	0	0	0	0	0	100
5	0	0	0	0	85.7	14.3	0	0	0	100
6	0	0	0	0	0	100	0	0	0	100
7	0	0	0	0	0	0	85.7	0	14.3	100
8	0	0	0	0	0	14.3	0	85.7	0	100
9	0	0	0	0	0	0	28.6	0	71.4	100

razões características, com valores atuando como li-miars. A vantagem deste método é que seria possível chegar a um diagnóstico medindo a reflectância em comprimentos de onda atuando como marcadores.

Para os patógenos estudados, as razões de reflectân-cia que apresentaram melhores desempenhos foram as combinações R443/R496, R443/R573, R443/R695, R443/R1900, R496/R573, R496/R695, R516/R1900 e R1900/R2435. A Tabela 3 apresenta os valores des-sas razões para a safra de 2017, observando-se que as duas doenças foliares mais importantes da videi-ra (míldio e oídio) diferiram na reflectância a razão R496/R573 das medidas do pé-preto, com valor mé-dio de 0,40 com desvio-padrão de 0,02. Isto signifi-ca que os efeitos da doença do pé-preto, medidos em 10 plantas sintomáticas, levaram a alterações espec-trais em 496 nm e 573 nm, de tal forma que o valor médio das razões de reflectância nestes comprimen-tos de onda foi 0,40, sendo as medidas individuais as-sumidas para ser distribuído em uma função gaussi-na em torno deste valor. Outras doenças para a razão R496/R573 apresentaram suas próprias razões de re-

flectância significativamente diferentes. A partir da Tabela 3, observa-se que há um efeito de fase (safra).

A Figura 3 mostra as distribuições gaussianas para as razões R443/R496 para 2017 e 2018, observando-se que para certas razões de comprimento de onda, as curvas de doenças se sobrepõem, efeito esperado, conforme a Figura 2. A análise da Figuras 3 permitiu derivar as faixas de valores de razões típicas para ca-da razão de comprimento de onda e doença. Esses in-tervalos para um desvio-padrão são apresentados na Tabela 4 para 2017 e 2018, expressando a magnitude das alterações espectrais derivadas de medições de reflectância direta em folhas de videira.

No entanto, pode-se observar que as faixas de 2017 são diferentes daquelas de 2018, indicando um efeito de safra que impacta as medidas de reflectân-cia, e indicando que as faixas derivadas até este ponto não são úteis para os propósitos deste estudo, usan-do a radiometria para medições gerais de campo. Baseando-se nos resultados da análise discriminante, observou-se que as medidas sintomáticas estão asso-ciadas aos seus controles, sugerindo que uma forma de resolver essa dificuldade seria incluir uma calibra-

Tabela 3. Valores médios e desvios-padrão para as razões de reflectância selecionadas como marcadores de ação dos patógenos estudados, safra 2017. Letras diferentes após os valores médios indicam diferenças significativas entre as médias ($\alpha = 0,05$) dos testes One-Way ANOVA e post-hoc de Tukey para comparações múltiplas. Conforme Pithan et al. (2021).

Razões	Míldio		Pé-preto		Doença de Petri		Oídio	
	$\bar{x}$	σ	$\bar{x}$	σ	$\bar{x}$	σ	$\bar{x}$	σ
443/496	1,01	0,03	0,97	0,03	1,02	0,04	1,08	0,01
443/573	0,44	0,03	0,39	0,03	0,45	0,06	0,60	0,06
443/695	0,55	0,03	0,47	0,04	0,56	0,06	0,71	0,05
443/1900	0,61	0,03	0,56	0,05	0,52	0,02	0,56	0,05
496/573	0,44	0,02	0,40	0,02	0,44	0,04	0,56	0,05
496/695	0,54	0,02	0,49	0,04	0,55	0,03	0,66	0,04
516/1900	1,04	0,09	1,09	0,16	0,88	0,13	0,75	0,06
1900/2435	0,71	0,01	0,72	0,02	0,73	0,01	0,75	0,01

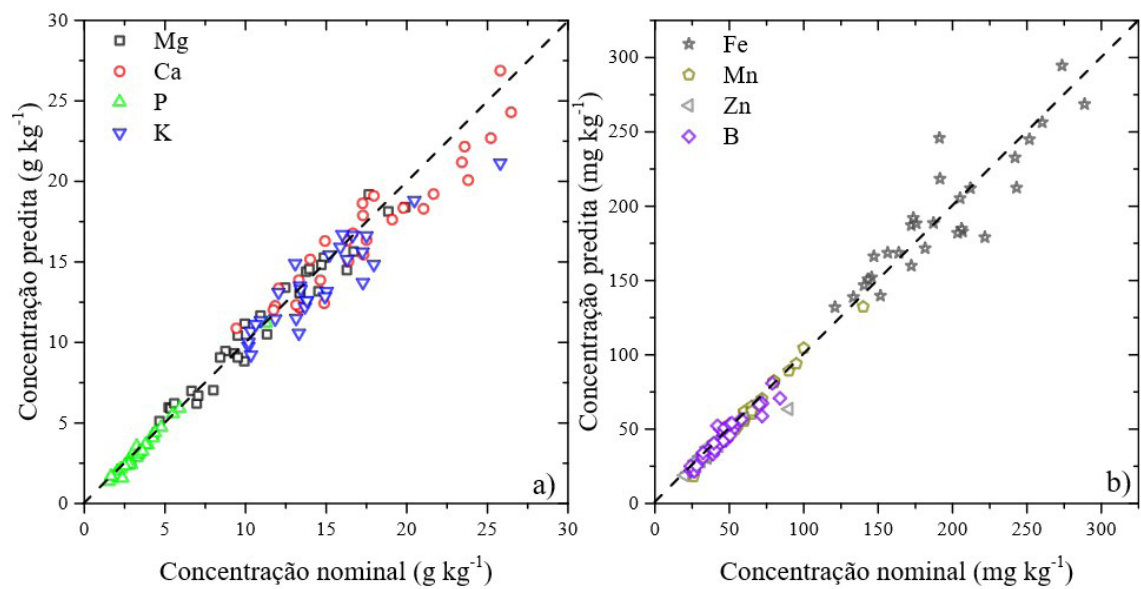


Figura 3. Distribuições gaussianas de razões de reflectância (razões de espectros) de doenças estudadas e controles para comprimentos de onda selecionados, temporada de 2017 e 2018. Os valores do eixo x são razões de reflectância adimensionais; os valores do eixo y são contagens; curvas têm áreas de 50 contagens. Conforme Pithan et al. (2021).

ção por dados de controle feitos na mesma estação. Testada a hipótese, para cada razão de comprimento de onda e ano, foram divididos os valores médios da Tabela 3 (para 2017) pelos seus respectivos valores de controle, o mesmo sendo feito para os dados de 2018.

Os quocientes derivados (limiares) são dados na Tabela 5; observando-se que os limiares para cada doença e razão de comprimento de onda tendem a se estabilizar de 2017 a 2018, sugerindo que o efeito sazonal foi compensado. Espera-se que os quocientes gerados seguindo esse raciocínio estejam próximos da unidade para plantas saudáveis. Quocientes diferentes da unidade poderiam ser indicadores de limia-

res sinalizando uma planta doente, pois, quanto mais longe da unidade, melhor indicador de uma planta doente. Esses resultados sugerem que, nesse delineamento experimental, os dados de plantas-controle sadias devem ser adquiridos juntamente com as medidas das plantas a serem monitoradas.

A Tabela 5 expressa o quanto o espectro de uma planta sintomática é alterado em relação ao espectro de uma planta saudável. Começando pela alteração expressa pela relação R443/R496, nota-se que a doença do pé-preto leva a uma alteração de cerca de 10%. Essa mesma doença, o pé-preto, também altera o espectro da relação R443/R573, mas em maior es-

Tabela 4. Faixas de razões de reflectância ($\pm 1\sigma$) para os comprimentos de onda indicados (nm) para 2017 e 2018. Conforme Pithan et al. (2021).

Razões de reflectância	Míldio	Pé-preto	Doença de Petri	Oídio
Campanha 2017				
R443/R496	0.98-1.04	0.94-1.00	0.98-1.06	1.07-1.09
R443/R573	0.41-0.47	0.36-0.42	0.39-0.51	0.54-0.66
R443/R695	0.51-0.58	0.43-0.51	0.50-0.62	0.66-0.76
R443/R1900	0.58-0.64	0.51-0.61	0.50-0.54	0.51-0.61
R496/R573	0.42-0.46	0.38-0.42	0.40-0.48	0.51-0.61
R496/R695	0.52-0.56	0.45-0.53	0.52-0.58	0.62-0.70
R516/R1900	0.95-1.13	0.93-1.25	0.75-1.01	0.69-0.81
R1900/R2435	0.70-0.72	0.70-0.74	0.72-0.74	0.74-0.76
Campanha 2018				
R443/R496	1.06-1.14	0.93-1.02	1.02-1.16	1.08-1.14
R443/R573	0.55-0.70	0.47-0.56	0.55-0.71	0.59-0.74
R443/R695	0.63-0.76	0.53-0.63	0.64-0.84	0.61-0.83
R443/R1900	0.59-0.69	0.49-0.59	0.59-0.85	0.54-0.75
R496/R573	0.51-0.62	0.46-0.55	0.51-0.61	0.48-0.66
R496/R695	0.59-0.68	0.54-0.64	0.61-0.72	0.57-0.74
R516/R1900	0.77-0.99	0.79-1.05	0.84-1.25	0.69-0.97
R1900/R2435	0.72-0.77	0.73-0.76	0.71-0.73	0.73-0.77

Tabela 5. Limiares para as doenças estudadas, derivados para cada ano (2017 e 2018), calibrados pelas medidas de controle adquiridas para cada estação. Conforme Pithan et al. (2021).

Razões de reflectância	Míldio		Pé-preto		Doença de Petri		Oídio	
	2017	2018	2017	2018	2017	2018	2017	2018
R443/R496	0.98	1.00	0.94	0.86	0.99	0.96	1.05	0.99
R443/R573	0.94	1.06	0.83	0.81	0.97	1.01	0.92	0.97
R443/R695	0.92	1.04	0.83	0.82	0.98	1.05	0.91	0.96
R443/R1900	1.00	0.86	1.02	0.93	0.94	1.20	0.95	1.16
R496/R573	0.95	1.05	0.88	0.92	0.97	1.04	0.95	0.96
R496/R695	0.94	1.04	0.88	0.96	0.99	1.08	0.94	0.98
R516/R1900	1.06	0.74	1.18	1.03	0.95	1.06	1.01	1.09
R1900/R2435	0.98	1.03	1.00	1.02	1.00	0.99	0.98	1.01

cala, até 17%; para esta relação, observa-se também uma mudança espectral sistemática para o oídio, mas em menor escala (3% a 5%). Essas duas doenças também foram observadas para a relação R443/R695, até cerca de 20% (pé-preto) e 5% a 8% (oídio). Para o míldio, a relação R443/R1900 pode ser um indicador útil, pois foram observadas alterações espectrais de até 14%. As relações R496/R573, R496/R695 e R516/

R1900 são indicadores úteis de sintomas de pé-preto e oídio. A relação R1900/R2435 parece ser menos útil. Em alguns casos, a alteração espectral foi grande, mas muda de uma safra para outra, como na doença de Petri em R443/R1900 e também para o oídio nesta mesma proporção. O mesmo foi para Petri em R496/R695 e em R516/R1900 para míldio. O método, portanto, funciona melhor para a detecção de pé-pre-

to e oídio. Em certos casos, pode ser apropriado para míldio e doença de Petri se for observada uma alteração espectral; mesmo que a direção da alteração mude de ano para ano, uma mudança em si já pode indicar uma planta doente.

Este estudo apresentou um método alternativo em comparação com outros com objetivos semelhantes baseados em medidas hiperespectrais para diversas culturas, como os métodos e resultados para trigo relatados por Huang et al. (2015), e de Abdel-Rahman et al. (2014) em pinheiros. Da mesma forma, Lorenzen e Jensen (1989) relataram como folhas de cevada de genótipos quase isogênicos, inoculadas com *Blumeria graminis* f.sp. *hordei* diferiram em sua reflectância espectral ao longo do tempo, e Kuska et al. (2015) relataram que a assinatura espectral dos genótipos resistentes de cevada

não apresentou alterações significativas ao longo do período experimental. Estudando folhas de beterraba, Rumpf et al. (2010) relataram uma investigação em que dados hiperespectrais dos patógenos *Cercospora beticola*, *Uromyces betae* ou *Erysiphe betae* causaram respectivamente *Cercospora* mancha foliar, ferrugem da beterraba e oídio, alcançando uma precisão de classificação entre 65% e 90%. No entanto, os comprimentos de onda específicos onde ocorrem mudanças espectrais e a magnitude das alterações ainda devem ser relatados.

Os coeficientes de correlação de Pearson e os valores de *p* entre clorofila total e reflectância nos oito comprimentos de onda selecionados são apresentados na Tabela 6 para míldio, pé-preto e doença de Petri, e a Tabela 7 apresenta resultados para oídio frente à clorofila a e clorofila b, conforme Pithan et al. (2021).

Tabela 6. Coeficientes de correlação de Pearson (*r*) e valores de *p* entre valores de clorofila total e reflectância de doenças. (1) míldio; (2) controle do míldio; (3) pé-preto; (4) doença de Petri; (5) controle do pé-preto e da doença de Petri. Apenas valores de *p* para correlações significativas são mostrados. Conforme Pithan et al. (2021).

Doença	1		2		3		4		5	
λ	<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>
443	-0.68	0.030	-0.63	0.050	-0.37		-0.57		-0.05	
496	-0.77	0.009	-0.79	0.007	-0.54		-0.70	0.024	-0.54	
516	-0.88	0.001	-0.82	0.004	-0.69	0.027	-0.76	0.011	-0.88	0.001
573	-0.90	0.000	-0.84	0.002	-0.67	0.034	-0.74	0.014	-0.91	0.000
695	-0.90	0.000	-0.73	0.017	-0.38		-0.77	0.009	-0.77	0.009
1420	-0.10		0.06		0.46		-0.13		0.14	
1900	-0.44		-0.19		0.23		0.05		0.03	
2435	-0.17		0.19		0.36		-0.10		0.09	

Tabela 7. Coeficientes de correlação de Pearson (*r*) e valores de *p* entre os valores de clorofila total (chl(a + b)), clorofila a (chl a), clorofila b (chl b) e reflectância do oídio (*powdery mildew*) e seu controle (*powdery mildew control*). Apenas valores de *p* para correlações significativas são mostrados. Conforme Pithan et al. (2021).

λ	Powdery mildew						Powdery mildew control					
	chl(a + b)		chl a		chl b		chl(a+b)		chl a		chl b	
	<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>
443	0.69	0.027	0.66	0.038	0.76	0.011	0.43		0.48		0.33	
496	0.63	0.050	0.60		0.70	0.024	0.05		0.10		-0.04	
516	0.13		0.16		0.05		-0.86	0.001	-0.84	0.002	-0.90	0.000
573	-0.02		0.01		-0.12		-0.93	0.000	-0.91	0.000	-0.95	0.000
695	0.14		0.16		0.06		-0.95	0.000	-0.94	0.000	-0.96	0.000
1420	0.08		0.10		0.01		-0.12		-0.11		-0.13	
1900	-0.17		-0.15		-0.24		-0.29		-0.27		-0.32	
2435	0.06		0.08		-0.01		-0.33		-0.32		-0.34	

Com base em Pithan et al. (2021), viu-se que o teor de clorofila foliar foi mais bem correlacionado com os comprimentos de onda mais curtos, até 695 nm; sugerindo que a partir de uma medição de clorofila é possível inferir o valor de reflectância em 443, 496, 516, 573 e 695 nm. Dada a disponibilidade de instrumentos de baixo custo como medidores de clorofila, estes poderiam ser utilizados num método para obter valores de reflectância necessários para a derivação dos limiares discutidos anteriormente.

4 CONCLUSÕES

Os resultados deste estudo mostram que as infecções causadas pelos patógenos *P. viticola*, *U. necator*, *D. macrodidyma* e *Phaeoacremonium* ssp., após a inoculação em videiras jovens, quando os sintomas ainda estão em estágio inicial, induzem alterações na reflectância em regiões espectrais características. Plantas expostas a patógenos ativam respostas de defesa em estágios iniciais, quando sintomas visuais da folha não estão presentes, reagem à presença de um patógeno com mecanismos fisiológicos, como a redução da taxa de fotossíntese, que, ao mesmo tempo em que induz um aumento da fluorescência e emissão de calor (West et al., 2003), induzem mudanças na reflectância. O oídio, avaliado espectralmente num estágio de infecção mais avançado, apresentou uma curva espectral próxima à do estágio inicial, com diferença na região espectral em relação ao teor de água da planta. Entretanto, mesmo em diferentes estágios de infecção, os espectros de reflectância seguem um padrão semelhante, principalmente na região do visível.

Foi desenvolvida metodologia em condições controladas em laboratório, visando à detecção de algumas doenças fúngicas que afetam as videiras, baseada em medições de reflectância espectral de folhas de videira, a qual produziu um conjunto de valores relacionados à reflectância, na forma de limiares, que podem ser utilizados em medições gerais realizadas em campo. A detecção de uma doença, em qualquer caso, requer também a observação de plantas assintomáticas usadas como controle.

A aplicação dessa metodologia no contexto da agricultura de precisão revela um enorme potencial. A capacidade de detecção precoce de doenças por meio de sensores espectrais, integrados a sistemas de agricultura de precisão, pode transformar significativamente o manejo de vinhedos. Sensores instalados em drones ou dispositivos móveis podem realizar medições contínuas e em tempo real, fornecendo dados que permitem uma resposta rápida e precisa a surtos de

doenças, minimizando o uso de fungicidas e otimizando os recursos.

O método tem potencial para o desenvolvimento de dispositivos para produzir dados em tempo real que podem ser processados automaticamente para dar, também em tempo real, um diagnóstico sobre o estado fitossanitário. Isso pode ser feito associando ao dispositivo de medição um processador capaz de realizar as operações básicas nos espectros observados. O dispositivo de observação em si não precisa ter a capacidade de observar completamente um espectro em alta resolução, já que a sensibilidade é necessária apenas em alguns comprimentos de onda predeterminados, um dispositivo fotossensível mais simples e barato pode ser projetado para realizar as medições, sintonizado com as doenças a serem detectadas.

No que diz respeito ao desenvolvimento de dispositivos para observação de campo em tempo real, os resultados sugerem que tais dispositivos devem ter sensibilidades espectrais do visível ao infravermelho próximo, valores limiares resultantes da observação de 443 nm estendendo-se a 1.900 nm e 2.435 nm. No entanto, é sabido que sensores sensíveis a esses comprimentos de onda tendem a ser mais caros e complexos de operar. O uso de sensores mais baratos com sensibilidades limitadas ao visível e até cerca de 1.000 nm, mesmo que reduzindo um pouco a precisão do método, ainda produziria resultados úteis.

A agricultura de precisão, ao incorporar essas tecnologias, não só facilita a detecção precoce e a resposta rápida a infecções, mas também promove práticas agrícolas mais sustentáveis e economicamente viáveis. A integração de sensores espectrais com sistemas de gestão de dados geoespaciais permite a criação de mapas detalhados de saúde das plantas, orientando a aplicação precisa de insumos e recursos. Isso, por sua vez, melhora a eficiência operacional e reduz os custos para os produtores, além de diminuir o impacto ambiental devido ao uso racional de pesticidas e fungicidas.

Como se pode deduzir dos resultados, o método desenvolvido neste estudo é amplamente exploratório, com foco num problema cuja solução é difícil de ser alcançada, pois as mudanças espectrais são pequenas e frequentemente se sobrepõem, os mesmos feitos em duas fases de observação, em que o estágio exato das doenças estudadas não pode ser avaliado com precisão. É possível que observações adicionais possam produzir indicadores mais precisos, ou preditores de doenças, uma vez que foram observados processos complexos de infestação de patógenos, a produção de indicadores precisos pode ser uma tare-

fa difícil. No entanto, se medições com alta precisão estiverem disponíveis, e nessa discussão sobre qualidade de dados sugere-se que seja o caso desses dados, tal desafio poderia ser mitigado.

Em resumo, a integração da espectroscopia de reflectância com a agricultura de precisão apresenta uma abordagem promissora para a gestão eficiente de doenças em vinhedos. Esta combinação de tecnologia e prática agrícola tem o potencial de transformar a viticultura, promovendo maior sustentabilidade, eficiência e rentabilidade.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às suas instituições. Os autores agradecem pelas bolsas da agência brasileira Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes).

REFERÊNCIAS

- ABDEL-RAHMAN, E. M.; MUTANGA, O.; ADAM, E.; ISMAIL, R. Detecting sirenix noctilio grey-attacked and lightning-struck pine trees using airborne hyperspectral data, random forest and support vector machines classifiers. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 88, p. 48-59, 2014. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.11.013>.
- BEGHI, R.; GIOVENZANA, V.; BRANCADORO, L.; GUIDETTI, R. Rapid evaluation of grape phytosanitary status directly at the check point station entering the winery by using visible/ near infrared spectroscopy. **Journal of Food Engineering**, v. 204, p. 46-54, 2017. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.02.012>.
- CAMARGO, U. A.; PROTAS, J. F. S.; MELLO, L. M. R. Grape growing and processing in Brazil. **Acta Horticulturae**, n. 785, p. 51-58, 2008. DOI: <http://doi.org/10.17660/ActaHortic.2008.785.2>.
- DE BEI, R.; COZZOLINO, D.; SULLIVAN, W.; CYNKAR, W.; FUENTES, S.; DAMBERGS, R.; PECH, J.; TYERMAN, S. Non-destructive measurement of grapevine water potential using near infrared spectroscopy. **Australian Journal of Grape and Wine Research**, v. 17, n. 1, p. 62-71, 2011. DOI: <http://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2010.00117.x>.
- DELALIEUX, S.; VAN AARDT, J.; KEULEMANS, W.; SCHREVEENS, E.; COPPIN, P. Detection of biotic stress (*Venturia Inaequalis*) in apple trees using hyperspectral data: non-parametric statistical approaches and physiological implications. **European Journal of Agronomy**, v. 27, n. 1, p. 130-143, 2007. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.eja.2007.02.005>.
- ETTABAA, K. S.; SALEM, M. B. Adaptive progressive band selection for dimensionality reduction in hyperspectral images. **Photonirvachak (Dehra Dun)**, v. 46, n. 2, p. 157-167, 2018. DOI: <http://doi.org/10.1007/s12524-017-0691-9>.
- FREIRE, L.; PASSAMANI, F. R. F.; THOMAS, A. B.; NASSUR, R. D. C. M. R.; SILVA, L. M.; PASCHOAL, F. N.; PEREIRA, G. E.; PRADO, G.; BATISTA, L. R. Influence of physical and chemical characteristics of wine grapes on the incidence of penicillium and aspergillus fungi in grapes and ochratoxin a in wines. **International Journal of Food Microbiology**, v. 241, p. 181-190, 2017. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2016.10.027>.
- GEBBERS, R.; ADAMCHUK, V. I. Precision agriculture and food security. **Science**, v. 327, n. 5967, p. 828-831, 2010. DOI: <http://doi.org/10.1126/science.1183899>.
- GRAEFF, S.; LINK, J.; CLAUPEIN, W. Identification of powdery mildew (*Erysiphe Graminis* Sp. Triticici) and take-all disease (*Gaeumannomyces Graminis* Sp. Triticici) in wheat (*Triticum aestivum* L.) by means of leaf reflectance measurements. **Open Life Sciences**, v. 1, n. 2, p. 275-288, 2006. DOI: <http://doi.org/10.2478/s11535-006-0020-8>.
- HUANG, L. S.; JU, S. C.; ZHAO, J. L.; ZHANG, D.; HONG, Q.; TENG, L.; YANG, F.; ZUO, Y. Hyperspectral measurements for estimating vertical infection of yellow rust on winter wheat plant. **International Journal of Agriculture and Biology**, v. 17, n. 6, p. 6, 2015. DOI: <http://doi.org/10.17957/IJAB/15.0034>.
- JACKSON, R. S. **Wine science: principles and applications**. 3rd ed. Cambridge: Academic Press, 2008. DOI: <http://doi.org/10.1016/B978-012373646-8.50007-X>.
- JACKSON, R. S. **Viticulture**. Reference Module in Food Science, p. 14. 2016. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.02871-7>
- JUNGES, A. H.; DUCATI, J. R.; LAMPUGNANI, C. S.; ALMANÇA, M. A. K. Detection of grapevine leaf stripe disease symptoms by hyperspectral sensor. **Phytopathologia Mediterranea**, v. 57, p. 399-406, 2018. DOI: http://doi.org/10.14601/Phytopathol_Mediterr-22862.
- KELLER, M. **The science of grapevines**. 3rd ed. Cambridge: Academic Press, 2020.
- KOMÁREK, M.; ČADKOVÁ, E.; CHRASTNÝ, V.; BORDAS, F.; BOLLINGER, J. Contamination of vineyard soils with fungicides: a review of environmental and toxicological aspects. **Environment International**, v. 36, n. 1, p. 138-151, 2010. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.envint.2009.10.005>.
- KUSKA, M.; WAHABZADA, M.; LEUCKER, M.; DEHNE, H. W.; KERSTING, K.; OERKE, E. C.; STEINER, U.; MAHLEIN, A. K. Hyperspectral phenotyping on microscopic scale – towards automated characterization of plant-pathogen interaction. **Plant Methods**, v. 11, n. 28, p. 1-14, 2015. DOI: <http://doi.org/10.1186/s13007-015-0073-7>.
- LORENTE, D.; ESCANDELL-MONTERO, P.; CUBERO, S.; GÓMEZ-SANCHÍS, J.; BLASCO, J. Visible-NIR reflectance spectroscopy and manifold learning methods applied to the detection of fungal infections on citrus fruit. **Journal of Food Engineering**, v. 163, p. 17-24, 2015. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.04.010>.
- LORENZEN, B.; JENSEN, A. Changes in leaf spectral properties induced in barley by cereal powdery mildew. **Remote**

- Sensing of Environment**, v. 27, n. 2, p. 201-209, 1989. DOI: [http://doi.org/10.1016/0034-4257\(89\)90018-7](http://doi.org/10.1016/0034-4257(89)90018-7).
- MAHLEIN, A. Plant disease detection by imaging sensors – parallels and specific demands for precision agriculture and plant phenotyping. **Plant Disease**, v. 100, n. 2, p. 241-251, 2016. DOI: <http://doi.org/10.1094/PDIS-03-15-0340-FE>.
- MALVERN PANALYTICAL. **ASD FieldSpec 4 Standard-Res Spectoradiometer**. 2020. Disponível em: <https://www.malvernpanalytical.com/en/products/product-range/asd-range>. Acesso em: 22 dez. 2020.
- NAIDU, R. A.; PERRY, E. M.; PIERCE, F. J.; MEKURIA, T. The potential of spectral reflectance technique for the detection of grapevine leafroll-associated virus in two red-berried wine grape cultivars. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 66, n. 1, p. 38-45, 2009. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.compag.2008.11.007>.
- PERTOT, I.; CAFFI, T.; ROSSI, V.; MUGNAI, L.; HOFFMANN, C.; GRANDO, M.S.; GARY, C.; LAFOND, D.; DUSO, C.; THIERY, D.; MAZZONI, V.; ANFORA, G. A critical review of plant protection tools for reducing pesticide use on grapevine and new perspectives for the implementation of IPM in viticulture. **Crop Protection (Guildford, Surrey)**, v. 97, p. 70-84, 2017. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.cropro.2016.11.025>.
- PITHAN, P. A.; DUCATI, J. R.; GARRIDO, L. R.; ARRUDA, D. C.; THUM, A. B.; HOFF, R. Spectral characterization of fungal diseases downy mildew, powdery mildew, black-foot and Petri disease on Vitisvinifera leaves. **International Journal of Remote Sensing**, v. 42, n. 15, p. 5680-5697, 2021. DOI: <http://doi.org/10.1080/01431161.2021.1929542>.
- RUMPF, T.; MAHLEIN, A. K.; STEINER, U.; OERKE, E. C.; DEHNE, H. W.; PLÜMER, L. Early detection and classification of plant diseases with support vector machines based on hyperspectral reflectance. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 74, n. 1, p. 91-99, 2010. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.compag.2010.06.009>.
- SANKARAN, S.; MISHRA, A.; EHSANI, R.; DAVIS, C. A review of advanced techniques for detecting plant diseases. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 72, n. 1, p. 1-13, 2010. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.compag.2010.02.007>.
- SCHROEDER, D. J. **Astronomical Optics**. Cambridge: Academic Press, 1999.
- WEST, J. S.; BRAVO, C.; OBERTE, R.; LEMAIRE, D.; MOSHOU, D.; MCCARTNEY, H.A. The potential of optical canopy measurement for targeted control of field crop diseases. **Annual Review of Phytopathology**, v. 41, n. 1, p. 593-614, 2003. DOI: <http://doi.org/10.1146/annurev.phyto.41.121702.103726>.