

**Universidade de São Paulo  
Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz**

**Progresso da ferrugem da videira (*Neophysopella tropicalis*) em ‘Niagara  
Rosada’ sob diferentes condições ambientais**

**Pamela Suellen Salvador Dutra**

Tese apresentada para a obtenção do título de Doutora em  
Ciências. Área de concentração: Fitopatologia.

**Piracicaba  
2022**

**Pamela Suellen Salvador Dutra**  
**Engenheira Agrônoma**

**Progresso da ferrugem da videira (*Neophytopella tropicalis*) em ‘Niagara Rosada’ sob diferentes condições ambientais**

Orientadora:  
Profa. Dra. **LILIAN AMORIM**

Tese apresentada para a obtenção do título de Doutora em Ciências. Área de concentração: Fitopatologia

**Piracicaba**  
**2022**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação**  
**DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP**

Dutra, Pamela Suellen Salvador

Progresso da ferrugem da videira (*Neophytopella tropicalis*) em 'Niagara Rosada' sob diferentes condições ambientais / Pamela Suellen Salvador Dutra. - - Piracicaba, 2022.

105 p.

Tese (Doutorado) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Ferrugem da videira 2. *Neophytopella tropicalis* 3. Cobertura plástica  
4. Limitação hídrica I. Título

Ao meu avô Elevítico (*In memoriam*), que me acolheu com todo seu amor e carinho e me motivou a ir atrás dos meus sonhos.

**Dedico**

## AGRADECIMENTOS

A Deus por sempre me guiar por todos meus caminhos percorridos.

À toda minha família, principalmente minha mãe, meus avós e minhas tias, que sempre me incentivaram e não mediram esforço para me ajudar a conquistar meus sonhos.

À minha professora e orientadora Lilian Amorim pelos seus ensinamentos e por sua paciência em acompanhar o meu desenvolvimento ao longo desses quatro anos de doutorado.

Ao Dr. Juan A. Navas-Cortés por aceitar me receber em sua instituição durante o meu período de permanência na Espanha e pelos seus valiosos ensinamentos em análises multivariadas.

Ao CNPQ (processo 140075/2019-4) pelo auxílio financeiro durante 16 meses do Doutorado.

À CAPES, pelo auxílio financeiro (código 001) durante o restante de meses do Doutorado no Brasil e também por possibilitar financeiramente a minha ida para Espanha através do programa CAPES/Print.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo apoio financeiro dos projetos em que eu tive a oportunidade de participar.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” pela oportunidade concedida e também aos professores do Programa de Pós-graduação em Fitopatologia que contribuíram para a minha formação acadêmica.

Ao Dr. Antônio Nogueira por todo auxílio e ensinamentos técnicos nos ensaios de trocas gasosas.

À Silvia Lourenço pelo todo auxílio na condução dos experimentos e atividades do laboratório.

À Profa. Dra. Beatriz Appezzato-da-Glória pelo auxílio nas análises histopatológicas.

Aos colegas de pós-graduação, Renan Alves, Manoel Penachio, Raquel Ribeiro, Ricardo Feliciano, Izabela Primiano, Gabriel Chitolina e Leonardo Mataram pela troca de conhecimento e por todos os momentos descontraídos.

Aos meus amigos de coração, Evelyn Shirado, Jacson Ferreira, Wesler Marcelino e Jéssica Maria por toda parceria e apoio.

Aos estagiários Ana Laura Simões, Matheus Amin, Lucas Sales, Henrique Soares, Érica Okamura por toda a disposição de me ajudarem nos experimentos em campo.

Ao Ortiz, ao Eder Cintra e ao Carlão pela permanente disposição e pela colaboração nas atividades e manejo das videiras no campo.

A todos que de alguma maneira fizeram parte dessa etapa da minha vida. OBRIGADA!!!!

## SUMÁRIO

RESUMO .....	7
ABSTRACT .....	8
1. INTRODUÇÃO GERAL .....	9
1.1 Cultura da videira .....	9
1.2 Sistemas de condução e cobertura plástica: efeitos no microclima e na incidência de doenças .....	10
1.3 Ferrugem da videira.....	12
1.4 Interferência de patógenos foliares na fisiologia e crescimento de plantas.....	13
1.5 Efeito da limitação hídrica na fisiologia e crescimento de plantas.....	16
1.6 Efeito dos estresses simultâneos (biótico e abiótico) na interação planta-patógeno e na fisiologia e crescimento de plantas .....	18
Referências .....	19
2. EFEITO DA COBERTURA PLÁSTICA E DOS SISTEMAS DE CONDUÇÃO NA MORFO-FISIOLOGIA DE NIAGARA ROSADA E NO PROGRESSO TEMPORAL DE <i>Neophysopella tropicalis</i> . .....	29
Resumo .....	29
Abstract.....	30
2.1 Introdução.....	31
2.2 Materiais e Métodos .....	33
2.2.1 Descrição da área experimental e tratos culturais .....	33
2.2.2 Estágios fenológicos de videiras nos diferentes sistemas de condução e sob cobertura plástica.....	35
2.2.3 Caracterização da anatomia foliar de plantas de ‘Niagara Rosada’ desenvolvidas sob cobertura plástica .....	35
2.2.4 Dinâmica dos urediniósporos de <i>Neophysopella tropicalis</i> sob cobertura plástica.....	36
2.2.5 Monitoramento das variáveis meteorológicas .....	37
2.2.6 Análise do progresso temporal da ferrugem da videira.....	38
2.2.7 Análise estatística .....	39
2.3 Resultados.....	41

2.3.1	Estágios fenológicos de videiras nos diferentes sistemas de condução e sob cobertura plástica .....	41
2.3.2	Caracterização da anatomia foliar de plantas de ‘Niagara Rosada’ desenvolvidas sob cobertura plástica.....	44
2.3.3	Dados meteorológicos.....	46
2.3.4	Dinâmica dos urediniósporos de <i>Neophytopella tropicalis</i> .....	49
2.3.5	Progresso temporal das epidemias de ferrugem.....	50
2.3.6	Elementos de curva .....	52
2.3.7	Análise de correlação de Pearson.....	53
2.3.8	Análise de Cluster .....	55
2.3.9	Análise de componentes principais (PCA) .....	57
2.4	Discussão .....	60
	Referências.....	64
3.	EFEITO DA LIMITAÇÃO HÍDRICA NA SEVERIDADE DA FERRUGEM, NA FISIOLOGIA E CRESCIMENTO DE VIDEIRAS.....	69
	Resumo.....	71
	Abstract .....	71
3.1	Introdução .....	70
3.2	Material e métodos.....	72
3.2.1	Obtenção das mudas.....	72
3.2.2	Determinação das necessidades hídricas de videira.....	73
3.2.3	Determinação do fator de disponibilidade hídrica em mudas envasadas de ‘Niagara rosada’.....	75
3.2.4	Definição dos tratamentos de estresse biótico e abiótico.....	77
3.2.5	Avaliação das variáveis de trocas gasosas de videira .....	78
3.2.6	Avaliação das variáveis relacionadas à ferrugem .....	79
3.2.7	Avaliação dos parâmetros de crescimento de videiras.....	79
3.2.8	Análises estatísticas.....	80
3.3	Resultados .....	81
3.3.1	Variáveis relacionadas às trocas gasosas de videira .....	81
3.3.2	Variáveis relacionadas à ferrugem da videira .....	84
3.3.3	Variáveis relacionadas ao crescimento de videira .....	87
3.4	Discussão .....	89
	APÊNDICES.....	101

## RESUMO

### **Progresso da ferrugem da videira (*Neophytophthora tropicalis*) em ‘Niagara Rosada’ sob diferentes condições ambientais**

A ferrugem da videira, causada por *Neophytophthora tropicalis*, é uma das doenças foliares mais destrutivas da viticultura tropical e subtropical. Embora presente no Brasil há mais de duas décadas, não há informações suficientes a respeito do progresso de *N. tropicalis* em diferentes condições ambientais. O microclima do dossel de videiras pode ser alterado em função das diferentes técnicas de condução de videira e com o uso de coberturas plásticas. Já o macroclima poderá ser alterado em decorrência das mudanças climáticas globais que se avizinham, devido às alterações nos padrões de precipitação e temperatura. A ocorrência de períodos de seca está cada vez mais frequente ao redor do mundo e esta tendência deverá aumentar no futuro. Esta situação é preocupante pois o estresse hídrico poderá influenciar a suscetibilidade de plantas a patógenos, além de afetar diretamente o crescimento e a produção de videiras. Dessa maneira, os principais objetivos desse trabalho foram: (i) avaliar o efeito da cobertura plástica e de diferentes sistemas de condução sobre o progresso temporal da ferrugem da videira e ii) determinar os efeitos do estresse hídrico na severidade da ferrugem e na fisiologia e crescimento de videiras. Em experimentos de campo, foram caracterizadas 15 epidemias da ferrugem da videira ocorridas entre as safras de 2014/2015 e 2019/20. As epidemias se desenvolveram a partir de fonte de inóculo natural e/ou artificial, em diferentes sistemas de condução de videira, com ou sem cobertura plástica. Em experimentos em casa de vegetação, mudas de videira foram submetidas aos seguintes tratamentos: sem estresse, estresse abiótico pela limitação hídrica, estresse biótico pela ferrugem e estresses abiótico e biótico simultâneos. As epidemias no campo conduzidas apenas por inóculo natural iniciaram mais tardiamente em relação às epidemias contendo inóculo artificial. A intensidade da doença variou entre as safras, entretanto, não foi possível verificar efeito direto dos sistemas de condução e da cobertura plástica no progresso temporal da ferrugem. O desenvolvimento da epidemia esteve relacionado principalmente à disponibilidade de inóculo e diferentes condições climáticas ao longo das safras. O estresse hídrico combinado com a infecção por *N. tropicalis* causaram alterações no metabolismo de carboidratos e reduções significativas nas trocas gasosas e no acúmulo de biomassa das raízes de videiras. Contudo, o maior impacto dos estresses combinados foi na assimilação líquida de CO<sub>2</sub> em razão da intensa necrose do tecido foliar, observada apenas nessas condições.

Palavras-chave: *Vitis labrusca*, Progresso temporal, Limitação hídrica, Estresse abiótico, Plasticultura, Sistemas de condução

## ABSTRACT

### **Temporal progress of grapevine leaf rust (*Neophysopella tropicalis*) on 'Niagara Rosada' under different environmental conditions**

Grapevine leaf rust, caused by *Neophysopella tropicalis*, is one of the most destructive leaf diseases in tropical and subtropical regions. This disease is present in Brazil for more than two decades, but there is little information about the progress of *N. tropicalis* under different environmental conditions. The canopy microclimate of vines can be altered depending on the different training systems and on the use of plastic cover. On the other hand, the macroclimate may be altered as a result of the upcoming global climate changes, due to changes in precipitation and temperature patterns. Droughts are becoming more frequent around the world and it is expected to increase in the future. Water stress can reduce plant susceptibility to diseases, as well as the growth and productivity of vines. Thus, the main objectives of this work were: (i) to evaluate the effect of plastic cover and of the different training systems on the temporal progress of *N. tropicalis* and ii) to determine the effects of water stress on rust severity and on vine physiology and growth. In field experiments, 15 grapevine rust epidemics were characterized, between the 2014/2015 and 2019/20 seasons. Epidemics developed from natural and/or artificial inoculum sources, in different training systems, with or without plastic cover. In greenhouse experiments, vine seedlings were submitted to the following treatments: no stress, abiotic stress due to water limitation, biotic stress due to *N. tropicalis* infection and simultaneous abiotic and biotic stresses. Field epidemics resulting from natural inoculum started later than epidemics developed from artificial inoculum. The intensity of the disease varied between the seasons; however, it was not possible to verify the direct effect of the training systems and the plastic cover on the disease temporal progress. The development of the epidemic was mainly related to the inoculum availability and different climatic conditions throughout the seasons. Water stress combined with *N. tropicalis* infection caused alterations in carbohydrate metabolism and significant reductions in gas exchange and in the biomass accumulation in grapevine roots. However, the combined stressors had the largest influence on net photosynthetic CO<sub>2</sub> assimilation because of the resulted necrosis of leaf tissue observed, exclusively, under these conditions.

**Keywords:** *Vitis labrusca*, Temporal progress, Water limitation, Plastic cover, Training systems

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

### 1.1 Cultura da videira

A uva (*Vitis* spp.) é uma das frutas mais produzidas no mundo com aproximadamente 75 milhões de toneladas produzidas por ano (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, 2022). Com uma produção de 1,6 milhão de toneladas, o Brasil ocupa hoje a 15ª posição entre os maiores produtores de uvas do mundo (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2022). Os Estados do Rio Grande do Sul, Pernambuco e São Paulo são os maiores produtores de uva e representam, respectivamente, 54,1%, 24,4 % e 9,0 % da produção nacional (IBGE, 2022).

A viticultura brasileira pode ser dividida em dois grandes mercados: o mercado destinado à produção de vinho, localizado principalmente na Região Sul, e o mercado consumidor de frutas *in natura* (uvas de mesa), predominante nas Regiões Sudeste e Nordeste (INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA, 2020).

O Estado de São Paulo, maior produtor de uvas de mesa, produz tanto as uvas europeias (*V. vinifera* L.), representadas pelas cultivares como ‘Itália’, ‘Rubi’ e ‘Benitaka’; quanto as uvas americanas (*Vitis labrusca* L.), representadas principalmente pela ‘Niagara Rosada’, uma das cultivares mais amplamente distribuídas (NACHTIGAL, 2003). A cv. Niagara Rosada foi originada através de uma mutação somática da cv. Niagara Branca e corresponde por aproximadamente 92% das plantas e 33% da produção de uva de mesa no Estado de São Paulo (PROTAS; CAMARGO, 2011; IEA, 2020; IBGE, 2022).

Em São Paulo, o sistema de produção 'Niagara Rosada' se destaca pela condução das videiras em sistema de espaldeira e pela poda curta, que é realizada no final do inverno, com colheita no final da primavera ou início do verão. No entanto, além da safra normal, pode-se obter uma safra adicional na qual normalmente são realizadas duas podas relacionadas ao ciclo de formação e produção. A técnica de duas podas é muito utilizada pelos produtores da região do noroeste paulista e permite a aquisição de melhores preços devido à concentração da colheita nos meses de entressafra das demais regiões produtoras do estado (CAMARGO et al., 2011; HERNANDES et al., 2013; POMMER, 2003; PROTAS; CAMARGO, 2011). (POMMER, 2003; PROTAS; CAMARGO, 2011; CAMARGO et al., 2011; HERNANDES et al., 2013).

Há diferentes sistemas de condução e manejo da videira. Nas regiões produtoras de uva os três sistemas mais comuns são: espaldeira, latada e Y (COSTA et al., 2012; MIELE; MANDELLI, 2005; TECCHIO et al., 2011). Na espaldeira, os ramos de videira são conduzidos em um plano vertical e a vegetação é sustentada por três ou quatro fios de arame (HERNANDES; PEDRO JÚNIOR, 2011). O sistema de espaldeira permite boa circulação de

ar e penetração de luz pelo dossel vegetativo, reduzindo o excesso de umidade (TECCHIO et al., 2011). No entanto, quando comparada a outros sistemas de condução, a espaldeira proporciona maior exposição dos cachos à radiação solar, além de menor produtividade (MIELE; MANDELLI, 2005). A latada é constituída por arames interligados que formam uma rede a 1,90 m acima do nível do solo e o dossel vegetativo da videira fica disposto horizontalmente. Este sistema protege os cachos da radiação solar excessiva, evitando o aumento exorbitante da temperatura e, conseqüentemente, a perda da qualidade dos frutos (TECCHIO et al., 2011). No sistema de condução em Y, as copas de videiras são conduzidas em dois planos inclinados em ângulos de 120-130° e os ramos são amarrados alternadamente aos arames para cada um dos lados dessa estrutura. Esse sistema vem ganhando popularidade na vitivinicultura paulista, pois proporciona melhor exposição foliar, aumentando a interceptação da radiação solar pelas copas de videira e, conseqüentemente, aumentando a qualidade dos frutos e a produtividade (PEDRO JÚNIOR et al., 2011; TECCHIO et al., 2011). Além disso, o sistema Y permite o uso simultâneo da cobertura plástica, tecnologia moderna que vem sendo utilizada pelos produtores para reduzir os danos causados pelas adversidades climáticas (impacto das chuvas, granizo e ventos fortes) durante o ciclo produtivo (CHAVARRIA, 2008; MOTA et al., 2008).

### **1.2 Sistemas de condução e cobertura plástica: efeitos no microclima e na incidência de doenças**

As características do sistema de condução da planta exercem efeito na altura e largura do dossel vegetativo e, dependendo da quantidade e distribuição das folhas, o microclima no interior do dossel pode ser alterado (MIELE; MANDELLI, 2005). Essa mudança microclimática, pode causar alterações significativas no crescimento e fisiologia das plantas, bem como nas relações planta-patógeno (PEDRO JÚNIOR et al., 2011).

Keller (2010) define microclima como o clima dentro e ao redor de um dossel ou dentro de um vinhedo que pode ser manipulado por meio de práticas culturais. Condições microclimáticas como luz, temperatura, umidade e velocidade do vento são significativamente influenciadas pela presença, quantidade e disposição das folhas no dossel (KELLER, 2010). Por sua vez, a germinação de esporos e as taxas de reprodução de patógenos dependem fortemente da temperatura, da umidade e, no caso de patógenos foliares, geralmente da duração do molhamento foliar (CAFFARRA et al. 2012; COLHOUN, 1973; HUBER: GILLESPIE, 1992). Dessa maneira, os sistemas de condução de plantas podem alterar o microclima de maneira a proporcionar, ou não, condições favoráveis para a infecção (MIELE; MANDELLI,

2005; CHAVARRIA et al., 2007; TIVOLI et al., 2013). Em geral, epidemias mais severas podem ocorrer em períodos prolongados com condições de temperatura, precipitação e umidade que estão próximas do ideal para o desenvolvimento de um patógeno (AGRIOS, 2005; TIVOLI et al., 2013). Por exemplo, a maior densidade do dossel vegetativo tende a reduzir a disponibilidade da luz ultravioleta a aumentar a umidade das folhas, promovendo o desenvolvimento de patógenos que preferem condições úmidas (HUBER; GILLESPIE, 1992; TIVOLI et al., 2013).

A cobertura plástica tem como princípio geral de controle de doenças a regulação do ambiente pela alteração do microclima em torno do dossel vegetativo (AGRIOS, 2005). Essa técnica cria um efeito “guarda-chuva” no dossel das videiras, restringindo a presença de água livre sobre as folhas e frutos, que é um fator essencial para o desenvolvimento de infecções fúngicas na cultura (POMER et al., 2003; MOTA et al., 2008). Diversos estudos já relataram a redução da incidência de doenças da videira com o uso de cobertura plástica associado a diferentes sistemas de condução (BATISTA et al., 2015; CHAVARRIA et al., 2007; HERNANDES; PEDRO JÚNIOR, 2011, PEDRO JÚNIOR et al., 2011).

Como o fluxo de ar ao redor do dossel é alterado pela redução da velocidade do vento, o uso da cobertura plástica também pode auxiliar na interceptação do inóculo primário e secundário de patógenos (CHAVARRIA et al., 2009; CARDOSO et al., 2010). Batista et al. (2015) observaram menor dispersão dos esporos de *N. tropicalis* e *Plasmopara viticola* em videiras conduzidas no sistema latada com cobertura plástica em relação ao sistema descoberto.

Outras alterações no microclima são afetadas com a cobertura plástica, como aumento das temperaturas máximas e médias e redução da radiação interceptada, as quais podem interferir em diferentes fases do ciclo do patógeno (CARDOSO et al., 2008; CHAVARRIA et al., 2007). A atenuação da radiação solar pela cobertura plástica retardou a perda de calor em relação as plantas de videira descobertas, resultando em uma maior amplitude térmica (CHAVARRIA et al., 2009). Essa atenuação da radiação pelas coberturas é importante pois pode afetar o processo fotossintético das plantas e, conseqüentemente, os recursos dos quais o crescimento, desenvolvimento e a produção de matéria seca das plantas são dependentes (PEZZOPANE et al., 2004).

A disponibilidade de radiação afetada pela cobertura plástica também pode causar mudanças anatômicas e estruturais das folhas (CHAVARRIA et al., 2012). A redução no nível de luz proporcionou redução no desenvolvimento da epiderme e nas espessuras do limbo foliar e dos parênquimas em videiras das cultivares Moscato Giallo e Niagara Rosada (CHAVARRIA et al., 2012; QUEIROZ-VOLTAN et al., 2011).

### 1.3 Ferrugem da videira

A ferrugem da videira é uma das doenças foliares mais destrutivas, especialmente nos trópicos (PRIMIANO et al., 2017; SANTOS et al., 2021). A ferrugem da videira é causada por diferentes espécies do gênero *Neophytophthora* (anteriormente classificado como *Phakopsora*) (JI et al. 2019; ONO, 2000). Este patógeno foi relatado em *Vitis* spp. em diversos países da Ásia (China, Japão, Tailândia, Indonésia, Coreia do Norte, Coreia do Sul, Malásia, Filipinas, Bangladesh e Taiwan) e, das Américas (Estados Unidos, Costa Rica, Porto Rico, Guatemala, El Salvador, Barbados, Colômbia, Cuba, Brasil, México e Venezuela), da Oceania (Austrália) e da África (Madagascar e Jamaica) (FARR; ROSSMAN, 2022). Na Ásia, a ferrugem foi relacionada a três espécies de *Neophytophthora*: *N. tropicalis*, *N. meliosmae-myrianthae* e *N. montana* (CHATASIRI; ONO, 2008; ONO et al. 2012, 2020). Nos Estados Unidos, outras duas espécies endêmicas foram relacionadas à ferrugem, a *N. uva* e a *N. muscadinae* (CHATASIRI; ONO, 2008). Na Europa ainda não houve relato do agente causal da ferrugem da videira (FARR; ROSSMAN, 2022).

No Brasil, a doença foi detectada pela primeira vez no em 2001, e desde então tem sido descrita em várias regiões, sendo atualmente considerada endêmica no País (PRIMIANO et al., 2017; TESSMANN et al., 2004). A espécie *N. tropicalis* predomina nas Regiões Sudeste e Sul, enquanto a *N. meliosmae-myrianthae* predomina na Região Nordeste do Brasil (SANTOS et al. 2021). Como o hospedeiro alternativo *Meliosma myriantha* não está presente no Brasil, os urediniosporos no ar são a única fonte de inóculo primário e constituem também o inóculo secundário da doença. Os urediniosporos são disseminados pelo vento, podendo atingir longas distâncias. A dispersão do patógeno pode também ocorrer através do transporte de esporos em material vegetativo contaminado ou vinculados aos humanos, máquinas e ferramentas (TESSMANN et al., 2004).

A ausência de luz favorece a germinação e a infecção de urediniosporos (ANGELOTTI et al., 2014). A germinação ocorre em uma faixa ampla de temperatura (5 a 35 °C), porém os maiores valores de germinação (acima de 50%) são observados entre 15 e 30 °C (ANGELOTTI et al., 2011; RASERA et al. 2021). Após a germinação, hifas de infecção são formadas e emitem apressórios, que formam o peg de penetração, os quais penetram através dos estômatos ou através das junções das células epidérmicas, em torno de 12 horas após a inoculação (RASERA et al., 2019). Temperaturas entre 15 a 30°C combinadas com duração de molhamento foliar de 6 horas são necessárias para a infecção por *N. tropicalis* (ANGELOTTI et al., 2014). Após a penetração, o fungo coloniza o espaço intercelular do mesófilo e forma o

haustório na célula hospedeira (RASERA et al. 2019). O período latente a 20–25 °C é de 7 dias, porém, varia de 6 a 14 dias sendo menor em temperaturas mais altas (ANGELOTTI et al., 2014). Maior severidade da doença tem sido relatada geralmente durante o verão, e em plantas expostas às temperaturas na faixa de 25 a 30 °C (ANGELOTTI et al., 2014). A doença tende também a ser mais severa em regiões que produzem mais de uma safra anual pois o patógeno pode sobreviver de uma safra a outra por meio da colonização de folhas videiras (TESSMANN et al. 2004). Por outro lado, a sobrevivência do patógeno pode ser prejudicada no inverno ou em regiões em que ocorre desfolha completa das plantas pois pode impedir ou reduzir a produção do inóculo para iniciar novas epidemias (TESSMANN et al., 2004).

A maioria das cultivares de *V. vinifera* e *V. labrusca*, incluindo ‘Niagara Rosada’, são suscetíveis ao patógeno (ANGELOTTI et al., 2008a; HENNESSY et al., 2007). Os sintomas característicos da ferrugem são pústulas contendo urediniósporos de coloração amarelo alaranjadas na face abaxial das folhas, que correspondem à área de lesões cloróticas na face adaxial. Quando as pústulas estão densamente agregadas, o tecido foliar entre as lesões coalesce, tornando-se seco e necrótico (PRIMIANO et al., 2019). Folhas com alta severidade da doença podem cair prematuramente (ANGELOTTI et al., 2008a; PRIMIANO et al., 2017). Essa desfolha precoce prejudica o acúmulo de reservas de carboidrato nas raízes da videira e, como resultado, o porta-enxerto fica enfraquecido, prejudicando a produção da safra seguinte (NOGUEIRA JUNIOR et al., 2017).

Em regiões subtropicais e tropicais, a doença pode ocorrer durante todo o ciclo produtivo, ao contrário de regiões de clima mais ameno em que a doença é vista comumente ao final do ciclo da cultura (SCAPIN-BUFFARA et al., 2018).

#### **1.4 Interferência de patógenos foliares na fisiologia e crescimento de plantas**

Os rendimentos das culturas estão intrinsecamente ligados à interceptação de radiação do dossel (índice de área foliar verde), assimilação de carbono pelas folhas (taxa fotossintética), e translocação e partição de fotoassimilados. As interações entre a planta e o patógeno alteram diversos processos fisiológicos do hospedeiro. Durante a infecção por patógenos, a assimilação de carbono é influenciada negativamente, assim como outros processos como respiração, translocação de metabólitos e nutrientes, entre outros (MANDAL et al., 2009).

As infecções por patógenos foliares, incluindo as ferrugens, podem prejudicar a assimilação líquida de CO<sub>2</sub> nas folhas (CARRETERO et al. 2011; GONÇALVES et al., 2022; MANDAL et al., 2009; NOGUEIRA JÚNIOR et al. 2017; SHTIENBERG, 1992; ZHAO et al., 2011). Os patógenos podem reduzir a taxa de fotossíntese líquida por diversas maneiras, sendo

elas: (i) efeitos na difusividade de CO<sub>2</sub> na folha (redução da condutância estomática e na concentração interna de CO<sub>2</sub>); (ii) aumento da taxa de respiração do hospedeiro ou da própria respiração do patógeno; ou (iii) por efeitos em processos bioquímicos (processos não estomáticos), como a captura de energia pelos fotossistemas (reduções de concentração de clorofila), taxa de transporte de elétrons e atividade de carboxilação das enzimas no ciclo de Calvin (CARRETERO et al. 2011; NIEDERLEITNER; KNOPPIK, 1997).

Patógenos foliares reduzem a atividade fotossintética nas áreas infectadas, reduzindo a área foliar verde (MORIONDO et al. 2005). Nesses casos, a redução da fotossíntese é diretamente proporcional ao aumento da severidade da doença (LOPES; BERGER, 2001). No entanto, alguns patógenos também afetam a fotossíntese em áreas foliares assintomáticas, adjacentes à lesão (BASSANEZI et al., 2001; CARRETERO et al., 2011; GONÇALVES et al., 2022; NOGUEIRA JÚNIOR et al. 2017; SHTIENBERG, 1992). O oídio (*Uncinula necator*) e o míldio (*Plasmopara viticola*) reduziram as taxas de assimilação de CO<sub>2</sub> em *Vitis vinifera*, não só através da redução da área foliar verde funcional (lesões visuais), mas também através de área foliar verde remanescente (MORIONDO et al., 2005). Na tentativa de descrever este efeito, Bastiaans (1991) propôs o conceito de “lesão virtual”, a que corresponde à área foliar onde não há fotossíntese. O modelo de Bastiaans é descrito pela equação  $P_x/P_o=(1-x)^\beta$ , onde  $P_x$  representa a assimilação líquida de CO<sub>2</sub> das folhas doentes,  $P_o$  representa a assimilação líquida de CO<sub>2</sub> média de folhas saudáveis e o  $\beta$  representa a relação entre a lesão virtual e a lesão visual (BASTIAANS, 1991). O valor de  $\beta$ , portanto, indica se o efeito da doença na fotossíntese é igual ( $\beta = 1$ ), menor ( $\beta < 1$ ) ou maior ( $\beta > 1$ ) àquele explicado pela área doente observada (BASTIAANS, 1991). Em diferentes cultivares de videira, a infecção por *N. tropicalis* causou uma redução significativa na taxa de assimilação de CO<sub>2</sub> nos tecidos verdes assintomáticos ao redor pústulas e os valores de  $\beta$  estimados variaram entre 4,99 e 5,93, indicando a existência de lesões virtuais (NAVARRO et al., 2019; NOGUEIRA JÚNIOR et al. 2017).

A infecção por patógenos muitas vezes leva ao desenvolvimento de manchas cloróticas e necróticas e, portanto, a uma diminuição na assimilação fotossintética com consequente redução no acúmulo de biomassa (CHOU et al., 2000; BASSANEZI et al., 2002; TANG; SCHOLLES, 1996; WINGLER; ROITSCH, 2008). Alguns patógenos causadores de ferrugem, como *N. tropicalis*, *Phakopsora pachyrhizi* e *Austropuccinia psidii*, também podem causar lesões necróticas nas folhas e reduzir significativamente a interceptação de luz e a eficiência da fotossíntese (NOGUEIRA JÚNIOR et al. 2017; PRIMIANO et al., 2020; GONÇALVES et al., 2022).

Diversos patógenos foliares são conhecidos por interromper a regulação da transpiração via cuticular ou estomática e/ou alterar a condutância estomática das folhas, afetando as relações hídricas dos tecidos vegetais (GRIMMER et al., 2012; NIEDERLEITNER; KNOPPIK, 1997; PINKARD; MOHAMMED, 2006). Esses patógenos podem aumentar, diminuir ou não modificar a transpiração das plantas infectadas. A ruptura da epiderme devido à emergência de pústulas de *Puccinia sorghi* e *Puccinia recondita* f. sp. *tritici* levou o aumento na transpiração das plantas de milho e trigo, mesmo em baixas severidades da doença (SHTIENBERG, 1992). Por outro lado, o colapso e a ruptura e dos vasos condutores causada pela colonização de *Colletotrichum lindemuthianum* acarretou em uma redução significativa na transpiração em folhas de feijoeiro infectadas com esse patógeno (BASSANEZI et al., 2001).

As plantas produzem carboidratos em suas folhas via fotossíntese e os exportam para órgãos drenos ou de armazenamento, como frutos, folhas jovens, ramos e raízes (SCHULTZ et al., 2013). Nas plantas C3, a sacarose é o principal açúcar transportado, representando 95% da fonte de carboidrato que é transportada através do floema. As invertases são responsáveis pela repartição de carbono nas plantas, pois auxiliam na conversão irreversível da sacarose em glicose e frutose no sítio de acúmulo (TAIZ et al., 2017).

Embora a repressão da fotossíntese e a alteração do metabolismo de carboidratos parece ser uma resposta à infecção por patógenos, essa alteração varia significativamente entre as diferentes interações planta-patógeno (BERGER et al., 2007; WRIGHT et al., 1995). Os fungos biotróficos, por exemplo, desenvolveram estruturas e mecanismos sofisticados que, durante a infecção, estabelecem mudanças na produção e distribuição de assimilados através do estabelecimento permanente de novos drenos que competem com drenos naturais na planta infectada (ABOOD; LÖSEL 2003; HALL; WILLIAMS, 2000; KANGASJÄRVI et al., 2012; OLIVA et al., 2014). Tanto os açúcares quanto os aminoácidos parecem ser facilmente transferidos do hospedeiro para os patógenos, por transportadores específicos na membrana haustorial, sendo a glicose a principal fonte de carbono transferida (HALL; WILLIAMS, 2000).

A infecção das folhas por patógenos biotróficos pode resultar em aumento ou diminuição da concentração de açúcares solúveis no local de infecção. O nível de açúcares pode ser reduzido devido ao consumo para fins energéticos e estruturais da planta, devido à própria absorção pelo patógeno ou devido à inibição da fotossíntese (BERGER et al. 2007). O aumento na atividade da enzima invertase, que é comumente observado em folhas infectadas, leva a um acúmulo de açúcares e amido no apoplasto que, por sua vez, regula negativamente fotossíntese pelo mau funcionamento do ciclo de Calvin (CHOU et al. 2000; JOOSTEN et al. 1990; WRIGHT et al. 1995). O míldio e o oídio da videira alteraram a atividade das invertases e

causaram o acúmulo de amido nas folhas, atuando como drenos alternativos das plantas (BREM et al., 1996). A formação de um dreno competitivo em folhas infectadas com esses patógenos tem o potencial de reduzir a biomassa e causar menores rendimentos nas culturas (BANCAL et al. 2012; NOGUEIRA JÚNIOR et al. 2017). Folhas de trigo infectadas por *Puccinia triticina* tiveram uma prioridade competitiva para assimilação de fotoassimilados em relação ao enchimento de grãos (BANCAL et al. 2012). Alterações no acúmulo de carboidratos em outros órgãos de reserva como as raízes são também observadas em plantas com ferrugens (NOGUEIRA JÚNIOR et al. 2017).

### **1.5 Efeito da limitação hídrica na fisiologia e crescimento de plantas**

A déficit hídrico é um dos fatores que mais restringem a produtividade agrícola (DOORENBOS; KASSAM, 1979; FAROOQ et al., 2009). O estresse por limitação hídrica afeta o crescimento das plantas em muitos níveis. No nível fisiológico, o déficit hídrico é percebido nas raízes e resulta em perda de turgescência, redução do potencial hídrico e diminuição da condutância estomática. Consequentemente, a concentração interna de CO<sub>2</sub> e a taxa líquida de fixação de carbono diminui resultando em baixas taxas de crescimento e produção de biomassa (SINGH-SANGWAN et al., 1994; ZHANG, H., SONNEWALD, 2017).

Uma das primeiras respostas das plantas à falta de água é o fechamento dos estômatos, que atua como estratégia de defesa da planta contra desidratação (CHAVES et al., 2003; FLEXAS et al., 2002). As respostas ao estresse hídrico são reguladas por vias dependentes e independentes do ácido abscísico (ABA). Em condições de baixo potencial de água no solo, o ABA é sintetizado nas raízes e transportado para as folhas através do xilema, modulando a condutância dos estômatos (ZHANG; SONNEWALD, 2017). A baixa condutância estomática reduz a transpiração e aprimora instantaneamente o uso eficiente de água (WUE), que em nível foliar é calculada pela relação entre a taxa de assimilação de CO<sub>2</sub> e a taxa de transpiração (CONDON et al., 2004; DU et al. 2008). No entanto, um prolongado fechamento estomático não é desejável, uma vez que a captação de CO<sub>2</sub> é reduzida levando à diminuição da difusão de CO<sub>2</sub> para o mesofilo foliar e causando redução na assimilação fotossintética (CHAVES, et al., 2003; GRIMMER et al 2012; SOUZA et al., 2001).

Um dos principais efeitos da seca é a redução da fotossíntese. Durante o estresse hídrico leve, a limitação estomática é um dos fatores que mais contribuem para a redução da taxa fotossintética, no entanto, sob estresse hídrico mais severo ou prolongado, a inibição não-estomática da fotossíntese foi descrita pelo declínio na eficiência da fotoquímica do fotossistema II (PSII), indisponibilidade de CO<sub>2</sub> nos cloroplastos e/ou diminuição da atividade

da Rubisco (FLEXAS; MEDRANO, 2002; FLEXAS et al., 2004). Em condições de estresse hídrico, a fotossíntese também pode ser prejudicada por uma diminuição na expansão foliar. A expansão da área foliar depende no turgor foliar, temperatura e disponibilidade de assimilados para o crescimento (NANOMI et al., 1998). A redução na produção de matéria seca é um efeito adverso comum do estresse hídrico em plantas cultivadas, causado em grande parte por efeitos inibitórios na expansão e desenvolvimento foliar (NONAMI, 1998). O estresse hídrico também leva a alterações no metabolismo primário das plantas, afetando o acúmulo de açúcares solúveis. Os açúcares solúveis, especialmente sacarose e seus subprodutos frutose e glicose, são base de construção metabólica e fonte de energia para o desenvolvimento e crescimento das plantas (ZHANG; SONNEWALD, 2017).

Diversos estudos mostraram que a limitação da disponibilidade de água em videira afeta a assimilação de CO<sub>2</sub> (*A*), a condutância estomática (*gs*) e a transpiração (*E*) (CHAVES et al., 2010; FLEXAS et al., 2002; SOUZA et al. 2001; ZUFFEREY et al., 2017). Plantas de videira ‘Niagara Rosada’, cultivadas sob dois regimes hídricos, apresentaram diminuição da taxa de assimilação líquida de CO<sub>2</sub>, de 10 μmol CO<sub>2</sub>.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>, nas plantas irrigadas, para 0,8 μmol CO<sub>2</sub>.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>, nas plantas submetidas ao déficit hídrico (SOUZA et al. 2001).

A sensibilidade de videiras ao estresse hídrico varia de acordo com as fases fenológicas da cultura sendo a fase vegetativa uma das mais críticas (KELLER; 2010; POMMER et al., 2003). Geralmente, o estresse hídrico moderado durante o período de maturação é favorável para o acúmulo de açúcar nas bagas e redução da acidez (ZUFFEREY et al., 2017). No entanto, um estresse hídrico súbito ou persistente durante a fase vegetativa da videira poderá causar murchamento e aparecimento de áreas necróticas nas folhas, bem como a desfolha das mesmas (POMMER et al., 2003). Se o estresse for gradativo, a planta pode se ajustar por meio da diminuição do crescimento da parte aérea, acarretando na redução da quantidade de matéria seca e produtividade (KELLER; 2010; POMMER et al., 2003). A assimilação de CO<sub>2</sub> reduzida em decorrência do fechamento estomático pode resultar também no esgotamento dos carboidratos armazenados (POMMER et al., 2003).

O fator de disponibilidade hídrica (fator *f*) representa a umidade crítica do solo à qual a cultura pode ser submetida sem afetar sua produção (ALBUQUERQUE, 2010). O valor de *f*=1 representa solo no ponto de murcha permanente (PMP) enquanto *f*=0 representa solo com umidade na capacidade de campo (CC) (ALBUQUERQUE, 2010). O fator *f* pode variar dependendo da demanda atmosférica em cada fase do ciclo da cultura, sendo maior quanto menor a evapotranspiração da cultura (ET<sub>c</sub>) (DOORENBOS; KASSAM, 1979). Para videira, são recomendados no manejo de irrigação valores médios para *f* entre 0,55 e 0,65, até o início

da maturação dos frutos. Após esse período, a necessidade ou não de irrigação depende da água disponível no solo e das condições climáticas (DOORENBOS; KASSAM, 1979). Na região Noroeste do Estado de São Paulo recomenda-se consumo de 50% da água disponível no solo ( $f=0,5$ ) para o manejo da irrigação em videiras (POMMER et al., 2003).

### **1.6 Efeito dos estresses simultâneos (biótico e abiótico) na interação planta-patógeno e na fisiologia e crescimento de plantas**

As plantas encontram múltiplos estresses abióticos (por exemplo, seca, inundações, calor ou frio extremo) combinados com estresses bióticos (por exemplo, infecção por patógenos, alimentação por insetos, ácaros ou nematoides), simultaneamente ou sequencialmente, que resultam em menor crescimento e realocação interna de recursos. Entre várias combinações de estresse biótico e abiótico, a interação simultânea de estresse hídrico (seca) e patógenos é uma das mais estudadas (ACHUO et al., 2006; CHOI et al., 2013; MAYEK-PEREZ et al., 2002; MCELTRONE et al., 2003; RAMEGOWDA et al., 2013).

Em campo, os patógenos podem infectar as plantas durante o período que a planta já está em estresse hídrico ou, o estresse hídrico pode ocorrer em plantas já infectadas com patógenos. As respostas das plantas a uma combinação de seca e patógeno é complexa e depende fortemente da cultura envolvida, estágio de desenvolvimento da cultura, relações nutricionais planta-patógeno (biotrófico/necrotrófico), estratégia de infecção do patógeno (penetração direta/através de estômatos, etc.) e intensidade e duração de cada estresse (ACHUO et al., 2006; ATKINSON; URWIN, 2012; KISSOUDIS et al., 2014; MCELTRONE; FORSETH, 2004; RAMEGOWDA; SENTHIL-KUMAR, 2015).

Um estresse hídrico moderado pode ativar a resposta de defesa basal das plantas expostas a essas condições, permitindo a defesa contra infecção de alguns patógenos. Durante o estresse hídrico moderado, a baixa assimilação de CO<sub>2</sub> poderá causar a redução de reservas de carbono não estruturais nas células foliares. O aumento da demanda de sacarose pelas folhas diminui o influxo de C nos biotróficos, que por sua vez, não poderão competir por açúcares com as células sob condições de estresse hídrico (OLIVA et al., 2014). Em contraste, a seca severa causa vazamento de nutrientes celulares no apoplasto, facilitando a infecção de outros patógenos, sobretudo, os necrotróficos (RAMEGOWDA; SENTHIL-KUMAR, 2015).

A ocorrência simultânea de diferentes estresses bióticos e abióticos resultaram em um alto grau de complexidade nas respostas da planta, controladas por diferentes vias de sinalizações que podem interagir e inibir umas às outras (ATKINSON; URWIN, 2012; PRASCH; SONNEWALD, 2013). O ácido salicílico (SA), induzido após infecção por fungos

biotróficos, pode atenuar a sinalização do ácido abscísico (ABA), que está envolvido com as respostas de defesa da planta ao estresse abiótico (KIM, 2012). O inverso também é verdadeiro, ou seja, o aumento na síntese de ABA induzido pela seca pode suprimir mecanismos de defesa mediados pelo SA, e conseqüentemente, aumentar a suscetibilidade a patógenos (MAYEK-PEREZ et al. 2002).

Em certas situações, plantas quando desafiadas com dois estresses priorizam simultaneamente sua resposta ao estresse mais prejudicial, aquele que requer ação imediata, anulando o caminho da defesa para o estresse menos grave (PRASCH; SONNEWALD, 2013). Assim, as estratégias de adaptação de plantas sob estresse combinado constituem diferentes tipos de respostas, dependendo da natureza e severidade dos estresses. Alguns estudos indicaram também que a combinação de seca e patógeno podem provocar respostas únicas nas plantas, que não são vistas quando cada estresse é imposto individualmente (CHOI et al., 2013; PRASCH; SONNEWALD, 2013). Por exemplo, a exposição de plantas *Vitis vinifera* à seca combinada a infecção por *Xylella fastidiosa* levou à modulação de 90 transcrições, das quais 39 eram exclusivas da combinação de estresses (CHOI et al., 2013).

O estresse hídrico combinado com a infecção de plantas por patógenos pode alterar características fisio-morfológicas, como fotossíntese, condutância estomática e taxa de transpiração, crescimento da planta e morfologia da raiz (IRULAPPAN; SENTHIL-KUMAR, 2018; SINHA et al., 2019). O estresse hídrico leva à deficiência nutricional em algumas plantas e este efeito secundário, juntamente com mudanças fisiológicas induzidas pela seca, podem agravar a infecção dos patógenos (LAWLOR; CORNIC, 2002).

## Referências

- ABOOD, J. K.; LÖSEL, D. M. Changes in carbohydrate composition of cucumber leaves during the development of powdery mildew infection. **Plant Pathology**, v. 52, n. 2, p. 256-265, 2003.
- ACHUO, E. A., PRINSEN, E., HÖFTE, M. Influence of drought, salt stress and abscisic acid on the resistance of tomato to *Botrytis cinerea* and *Oidium neolycopersici*. **Plant pathology**, v. 55, n. 2, p. 178-186, 2006.
- AGRIOS, G. N. **Plant Pathology**. 5. th. Amsterdam: Elsevier Academic Press, 2005. p. 922.
- ALBUQUERQUE, P. E. P. Estratégias de manejo de irrigação: exemplos de cálculo. Embrapa Milho e Sorgo, 2010.
- ANGELOTTI, F., SCAPIN, C. R., TESSMANN, D. J., VIDA, J. B., VIEIRA, R. A., & DE SOUTO, E. R. Resistência de genótipos de videira à ferrugem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 9, p. 1129-1134, 2008.

- ANGELOTTI, F., TESSMANN, D. J., SCAPIN, C. R., VIDA, J. B. Effect of temperature and light on germination of urediniospores of *Phakopsora euvitidis*. **Summa Phytopathologica**, v. 37, n. 1, p. 59-61, 2011.
- ANGELOTTI, F., SCAPIN, C. R., TESSMANN, D. J., VIDA, J. B., & CANTERI, M. G. The effect of temperature, leaf wetness and light on development of grapevine rust. **Australasian Plant Pathology**, v. 43, n. 1, p. 9-13, 2014.
- ATKINSON, N. J.; URWIN, P. E. The interaction of plant biotic and abiotic stresses: from genes to the field. **Journal of experimental botany**, v. 63, n. 10, p. 3523-3543, 2012.
- AYRES, P. G. Effect of water potential of pea leaves on spore production by *Erysiphe pisi* (powdery mildew). Transactions of the British **Mycological Society**, v. 68, n. 1, p. 97-100, 1977.
- BANCAL, M. O.; HANSART, A.; SACHE, I.; & BANCAL, P. Modelling fungal sink competitiveness with grains for assimilates in wheat infected by a biotrophic pathogen. **Annals of Botany**, v. 110, n. 1, p. 113-123, 2012.
- BASSANEZI, R. B.; AMORIM, L.; FILHO, A. B.; HAU, B.; & BERGER, R. D. Accounting for photosynthetic efficiency of bean leaves with rust, angular leaf spot and anthracnose to assess crop damage. **Plant Pathology**, v. 50, n. 4, p. 443-452, 2001.
- BASSANEZI, R. B.; AMORIM, L.; FILHO, A. B.; & BERGER, R. D. Gas exchange and emission of chlorophyll fluorescence during the monocycle of rust, angular leaf spot and anthracnose on bean leaves as a function of their trophic characteristics. **Journal of Phytopathology**, v. 150, n. 1, p. 37-47, 2002.
- BASTIAANS, L. Leaf Photosynthesis of Rice Due to Leaf Blast. **Phytopathology**, v. 81, p. 611-615, 1991.
- BATISTA, C. D., BARBOSA, M. A. G., DE MOURA, M. S. B., & DOS ANJOS, J. B. Dinâmica de inóculos e doenças em videira sob sistema convencional e protegido. **Revista Caatinga**, v. 28, n. 2, p. 256-262, 2015.
- BERGER, S.; SINHA, A. K.; ROITSCH, Thomas. Plant physiology meets phytopathology: plant primary metabolism and plant-pathogen interactions. **Journal of experimental botany**, v. 58, n. 15-16, p. 4019-4026, 2007.
- BETHENOD, O.; HUBER, L.; SLIMI, H. Photosynthetic response of wheat to stress induced by *Puccinia recondita* and post-infection drought. **Photosynthetica**, v. 39, n. 4, p. 581-590, 2001.
- BREM, S.; RAST, D. M.; RUFFNER, H. P. Partitioning of photosynthate in leaves of *Vitis vinifera* infected with *Uncinula necator* or *Plasmopora viticola*. Physiological and **Molecular Plant Pathology**, v. 29, n. 3, p. 285-291, 1986.
- CAFFARRA, A.; RINALDI, M.; ECCEL, E.; ROSSI, V. & PERTOT, I. Modelling the impact of climate change on the interaction between grapevine and its pests and pathogens: European grapevine moth and powdery mildew. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 148, p. 89-101, 2012.
- CAMARGO, U. A., TONIETTO, J., HOFFMANN, A. Progressos na viticultura brasileira. **Revista Brasileira de Fruticultura**, p.144-149, 2011.
- CARDOSO L. S.; BERGAMASCHI H.; COMIRAN F.; CHAVARRIA, G.; MARODIN, G. A. B.; DALMAGO, G. A.; ... & MANDELLI, F. Padrões de interceptação de radiação solar

- em vinhedos com e sem cobertura plástica. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 32, n. 1, p. 161-171, 2010.
- CARRETERO, R.; BANCAL, M. O.; MIRALLES, D. J. Effect of leaf rust (*Puccinia triticina*) on photosynthesis and related processes of leaves in wheat crops grown at two contrasting sites and with different nitrogen levels. **European Journal of Agronomy**, v. 35, n. 4, p. 237-246, 2011.
- CARTER, A. H.; CHEN, X. M.; GARLAND-CAMPBELL, K.; & KIDWELL, K. K. Identifying QTL for high-temperature adult-plant resistance to stripe rust (*Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*) in the spring wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivar 'Louise'. **Theoretical and Applied Genetics**, v. 119, n. 6, p. 1119-1128, 2009.
- CHATASIRI, S.; ONO, Y. Phylogeny and taxonomy of the Asian grapevine leaf rust fungus, *Phakopsora euvitis*, and its allies (Uredinales). **Mycoscience**, v. 49, n. 1, p. 66-74, 2008.
- CHAVARRIA, G.; SANTOS, H. P. D.; SÔNEGO, O. R.; MARODIN, G. A. B.; BERGAMASCHI, H.; CARDOSO, L. S. Incidência de doenças e necessidade de controle em cultivo protegido de videira. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 29, p. 477-482, 2007.
- CHAVARRIA, G.; SANTOS, H. P. D.; CASTRO, L. A. S. D.; MARODIN, G. A. B., & BERGAMASCHI, H. Anatomy, chlorophyll content and photosynthetic potential in grapevine leaves under plastic cover. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 34, n. 3, p. 661-668, 2012.
- CHAVARRIA, G.; SANTOS, H. P. Cultivo protegido de videira: manejo fitossanitário, qualidade enológica e impacto ambiental. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 35, n. 3, p. 910-918, 2013.
- CHAVES, M. M.; MAROCO, J. P.; PEREIRA, J. S. Understanding plant responses to drought—from genes to the whole plant. **Functional plant biology**, v. 30, n. 3, p. 239-264, 2003.
- CHAVES, M. M.; ZARROUK, O.; FRANCISCO, R.; COSTA, J. M.; SANTOS, T.; REGALADO, A. P., ... & LOPES, C. M. Grapevine under deficit irrigation: hints from physiological and molecular data. **Annals of botany**, v. 105, n. 5, p. 661-676, 2010.
- CHOI, H. K., IANDOLINO, A., DA SILVA, F. G., & COOK, D. R. Water deficit modulates the response of *Vitis vinifera* to the Pierce's disease pathogen *Xylella fastidiosa*. **Molecular Plant-Microbe Interactions**, v. 26, n. 6, p. 643-657, 2013.
- CHOU, H. M.; BUNDOCK, N.; ROLFE, S. A.; & SCHOLE, J. D. Infection of *Arabidopsis thaliana* leaves with *Albugo candida* (white blister rust) causes a reprogramming of host metabolism. **Molecular Plant Pathology**, v. 1, n. 2, p. 99-113, 2000.
- COAKLEY, S. M.; SCHERM, H. Plant disease in a changing global environment. **Aspects of Applied Biology**, v.45, p. 227-238, 1996.
- COLHOUN, J. Effects of environmental factors on plant disease. **Annual review of phytopathology**, v. 11, n. 1, p. 343-364, 1973.
- COLLINS, M.; KNUTTI, R.; ARBLASTER, J.; DUFRESNE, J. L.; FICHEFET, T.; FRIEDLINGSTEIN, P.; ... & SHONGWE, M. **Long-term climate change: projections, commitments and irreversibility**. In: Climate Change 2013-The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 2013. p. 1029-1136.

- COMIRAN, F., BERGAMASCHI, H., HECKLER, B. M. M., SANTOS, H.P., ALBA, D., SARETTA, E. Microclima e produção de videiras 'Niágara Rosada' em cultivo orgânico sob cobertura plástica. **Revista Brasileira de Fruticultura**. Vol. 34, n. 1, p. 152-159, 2012.
- COSTA, T.V., TARSITANO, M.A.A., CONCEIÇÃO, M.A.F. Caracterização social e tecnológica da produção de uvas para mesa em pequenas propriedades rurais da região de Jales-SP. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal - SP, v. 34, n. 2, p. 766-773, 2012.
- DE BEM, B. P.; BOGO, A; EVERHART, S. E.; CASA, R. T.; GONÇALVES, M. J.; MARCON FILHO, J. L., ... & DA CUNHA, I. C. Effect of four training systems on the temporal dynamics of downy mildew in two grapevine cultivars in southern Brazil. **Tropical Plant Pathology**, v. 41, n. 6, p. 370-379, 2016.
- DE BEM, B.P.; BOGO A., ALLEBRANDT, R.; MARCON FILHO, J.L.; WURZ, D.A.; BRIGHENTI, A. F.; RUFATO, L. Botrytis bunch rot on 'Sauvignon Blanc' grapevine on the Y-trellis and vertical shoot-positioned training systems. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 52, p. 818-822, 2017.
- DELOIRE, A.; VAUDOUR, E.; CAREY, V.; BONNARDOT, V.; VAN LEEUWEN, C. **Grapevine responses to terroir: a global approach**. Journal International Des Sciences de la Vigne et Du vin, Bordeaux, v. 39, n. 4, p. 149- 162. 2005.
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. Yield response to water. **Irrigation and drainage paper**, v. 33, p. 257, 1979.
- DU, T., KANG, S.; ZHANG, J.; LI, F.; & YAN, B. Water use efficiency and fruit quality of table grape under alternate partial root-zone drip irrigation. **Agricultural water management**, v. 95, n. 6, p. 659-668, 2008.
- FAOSTAT. **Food and Agriculture Organization of the United Nations**. 2022. Recuperado de: <https://www.fao.org/faostat/en/#data>
- FARR, D. F., ROSSMAN, A.Y. **Fungal databases, systematic mycology and microbiology laboratory**, ARS, USDA. 2022. Disponível em: < <http://nt.ars-grin.gov/fungaldatabases/>>. Acesso em: 11/01/2022.
- FAROOQ, M.; WAHID, A.; KOBAYASHI, N. S. M. A.; FUJITA, D. B. S. M. A.; & BASRA, S. M. A. Drought stress: effects, mechanisms and management. In: **Sustainable agriculture**. Springer, Dordrecht, 2009. p. 153-188.
- FLEXAS, J.; MEDRANO, H. Drought-inhibition of photosynthesis in C3 plants: stomatal and non-stomatal limitations revisited. **Annals of botany**, v. 89, n. 2, p. 183-189, 2002.
- FLEXAS, J.; BOTA, J.; ESCALONA, J. M.; SAMPOL, B.; & MEDRANO, H. Effects of drought on photosynthesis in grapevines under field conditions: an evaluation of stomatal and mesophyll limitations. **Functional Plant Biology**, v. 29, n. 4, p. 461-471, 2002.
- GONÇALVES, M. P.; NOGUEIRA JUNIOR, A. F.; RIBEIRO, R. V.; & AMORIM, L. Monocyclic components and photosynthetic damage caused by myrtle rust in guava leaves. **Phytopathology**, n. ja, 2022.
- GRIMMER, M. K.; JOHN FOULKES, M.; PAVELEY, N. D. Foliar pathogenesis and plant water relations: a review. **Journal of experimental botany**, v. 63, n. 12, p. 4321-4331, 2012.

- HALL, J. L.; WILLIAMS, L. E. Assimilate transport and partitioning in fungal biotrophic interactions. **Functional Plant Biology**, v. 27, n. 6, p. 549-560, 2000.
- HENNESSY, C. R.; DALY, A. M.; HEARNDEN, M. N. Assessment of grapevine cultivars for resistance to *Phakopsora euvitis*. **Australasian Plant Pathology**, v. 36, n. 4, p. 313-317, 2007.
- HERNANDES, J. L.; PEDRO JÚNIOR, M. J.; AND BLAIN, G. C. Fenologia e produção da videira 'Niagara Rosada' conduzida em manjedoura na forma de Y sob telado plástico durante as safras de inverno e de verão. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 33, p. 499-504, 2011.
- HUBER, L.; GILLESPIE, T. J. Modeling leaf wetness in relation to plant disease epidemiology. **Annual review of phytopathology**, v. 30, n. 1, p. 553-577, 1992.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola: Censo Agro**. 2022. Recuperado de: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1618>.
- IEA. Instituto de Economia Agrícola. **Estatísticas da produção paulista**. 2020. Recuperado de: [http://ciagri.iea.sp.gov.br/nia1/subjetiva.aspx?cod\\_sis=1&idioma=1](http://ciagri.iea.sp.gov.br/nia1/subjetiva.aspx?cod_sis=1&idioma=1).
- IRULAPPAN, V.; SENTHIL-KUMAR, M. Morpho-physiological traits and molecular intricacies associated with tolerance to combined drought and pathogen stress in plants. In: **Biotechnologies of Crop Improvement**, Volume 3. Springer, Cham, 2018. p. 59-74.
- JI, J. X.; LI, Z.; LI, Y.; AND KAKISHIMA, M. J. Life cycle of *Nothoravenelia japonica* and its phylogenetic position in Pucciniales, with special reference to the genus *Phakopsora*. **Mycological Progress**, v. 18, n. 6, p. 855-864, 2019.
- JOOSTEN, M. H. A. J.; HENDRICKX, L. J. M.; DE WIT, P. J. G. M. Carbohydrate composition of apoplastic fluids isolated from tomato leaves inoculated with virulent or avirulent races of *Cladosporium fulvum* (syn. *Fulvia fulva*). **Netherlands Journal of Plant Pathology**, v. 96, n. 2, p. 103-112, 1990.
- JONES, H. **Plant and macrolimate: a quantitative approach to environmental plant physiology**. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1992. 428 p.
- KANGASJÄRVI, S.; NEUKERMANS, J.; LI, S.; ARO, E. M.; & NOCTOR, G. Photosynthesis, photorespiration, and light signalling in defence responses. **Journal of experimental botany**, v. 63, n. 4, p. 1619-1636, 2012.
- KELLER, M. **The Science of Grapevines - Anatomy and Physiology**. Washington, USA: Elsevier, 2010.
- KIM, T. Plant stress surveillance monitored by ABA and disease signaling interactions. **Molecules and cells**, v. 33, n. 1, p. 1-7, 2012.
- KISSOUDIS, C.; VAN DE WIEL, C.; VISSER, R. G.; & VAN DER LINDEN, G. Enhancing crop resilience to combined abiotic and biotic stress through the dissection of physiological and molecular crosstalk. **Frontiers in plant science**, v. 5, p. 207, 2014.
- LAWLOR, D. W<sup>†</sup>; CORNIC, G. Photosynthetic carbon assimilation and associated metabolism in relation to water deficits in higher plants. **Plant, cell & environment**, v. 25, n. 2, p. 275-294, 2002.
- LOPES, D. B.; BERGER, R. D. The effects of rust and anthracnose on the photosynthetic competence of diseased bean leaves. **Phytopathology**, v. 91, n. 2, p. 212-220, 2001.

- MIELE, A., MANDELLI, F. **Sistemas de condução da videira**. Embrapa Uva e Vinho, 2013.
- MANICA I.; POMMER C V. **Uva: do Plantio a Produção, Pós-colheita e Mercado**. Porto Alegre: Cinco Continentes, 2006.
- MANDAL, K.; SARAVANAN, R.; MAITI, S., & KOTHARI, I. L. Effect of downy mildew disease on photosynthesis and chlorophyll fluorescence in *Plantago ovata* Forsk. **Journal of Plant Diseases and Protection**, v. 116, n. 4, p. 164-168, 2009.
- MAYEK-PÉREZ, N., GARCÍA-ESPINOSA, R., LÓPEZ-CASTAÑEDA, C., ACOSTA-GALLEGOS, J. A., & SIMPSON, J. Water relations, histopathology and growth of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) during pathogenesis of *Macrophomina phaseolina* under drought stress. **Physiological and Molecular Plant Pathology**, v. 60, n. 4, p. 185-195, 2002.
- MCELDRONE, A. J., SHERALD, J. L., FORSETH, I. N. Interactive effects of water stress and xylem-limited bacterial infection on the water relations of a host vine. **Journal of Experimental Botany**, v. 54, n. 381, p. 419-430, 2003.
- MORIONDO, M.; ORLANDINI, S.; GIUNTOLI, A.; & BINDI, M. The effect of downy and powdery mildew on grapevine (*Vitis vinifera* L.) leaf gas exchange. **Journal of Phytopathology**, v. 153, n. 6, p. 350-357, 2005.
- MOTA, C.S., AMARANTE, C.V.T., SANTOS, H.P., ZANARDI, O. Z. Comportamento vegetativo e produtivo de videiras 'Cabernet Sauvignon' cultivadas sob cobertura plástica. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 30, n. 1, p. 148-153, 2008.
- NACHTIGAL, J.C. **Avanços tecnológicos na produção de uvas de mesa**. Anais do X Congresso Brasileiro de Viticultura e Enologia, p.167-170, 2003.
- NONAMI, H. Plant water relations and control of cell elongation at low water potentials. **Journal of Plant Research**, v. 111, n. 3, p. 373-382, 1998.
- NAVARRO, B. L.; NOGUEIRA JÚNIOR, A. F.; RIBEIRO, R. V.; & SPÓSITO, M. B. Photosynthetic damage caused by grapevine rust (*Phakopsora euvitidis*) in *Vitis vinifera* and *Vitis labrusca*. **Australasian Plant Pathology**, v. 48, n. 5, p. 509-518, 2019.
- NIEDERLEITNER, S.; KNOPPIK, D. Effects of the cherry leaf spot pathogen *Blumeriella jaapii* on gas exchange before and after expression of symptoms on cherry leaves. **Physiological and Molecular Plant Pathology**, v. 51, n. 3, p. 145-153, 1997.
- NOGUEIRA JÚNIOR, A. F., RIBEIRO, R. V., APPEZZATO-DA-GLÓRIA, B., SOARES, M. K., RASERA, J. B., AND AMORIM, L. *Phakopsora euvitidis* causes unusual damage to leaves and modifies carbohydrate metabolism in grapevine. **Frontiers in plant science**, v. 8, p. 1675, 2017.
- OLIVA, J.; STENLID, J.; MARTÍNEZ-VILALTA, J. The effect of fungal pathogens on the water and carbon economy of trees: implications for drought-induced mortality. **New Phytologist**, v. 203, n. 4, p. 1028-1035, 2014.
- ONO, Y. Taxonomy of the *Phakopsora ampelopsidis* species complex on vitaceous hosts in Asia including a new species, *P. euvitidis*. **Mycologia**, p. 154-173, 2000.
- ONO, Y., CHATASIRI, S., POTA, S., YAMAOKA, Y. *Phakopsora montana*, another grapevine leaf rust pathogen in Japan. **Journal of general plant pathology**, v. 78, n. 5, p. 338-347, 2012.

- ONO, Y., OKANE, I.; CHATASIRI, S.; POTA, S.; UNARTNGAM, J.; AYAWONG, C., ... AND LE, C. T. M. Taxonomy of Southeast Asian-Australasian grapevine leaf rust fungus and its close relatives. **Mycological Progress**, v. 19, n. 9, p. 905-919, 2020.
- PAUL, N. D., AYRES, P. G. Effects of rust and post-infection drought on photosynthesis, growth and water relations in groundsel. **Plant Pathology**, v. 33, n. 4, p. 561-569, 1984.
- PEDRO JÚNIOR, M. J.; HERNANDES, J. L.; ROLIM, G. S. Sistema de condução em Y com e sem cobertura plástica: microclima, produção, qualidade do cacho e ocorrência de doenças fúngicas na videira 'Niagara Rosada'. **Bragantia**, v. 70, n. 1, p. 228-233, 2011.
- PEZZOPANE, J. E. M., DE OLIVEIRA, P. C., DOS REIS, E. F., LIMA, J. S. S. Alterações microclimáticas causadas pelo uso de tela plástica, **Engenharia Agrícola**, v.24, n.1, p. 9- 15, 2004.
- PINKARD, E. A.; MOHAMMED, C. L. Photosynthesis of Eucalyptus globulus with Mycosphaerella leaf disease. **New Phytologist**, v. 170, n. 1, p. 119-127, 2006.
- POMMER, C.V. Uva: Tecnologia de Produção, Pós-colheita, Mercado. Porto Alegre: Cinco Continentes, 778 p, 2003.
- POURTAU, N.; JENNINGS, R., PELZER, E.; PALLAS, J.; & WINGLER, A. Effect of sugar-induced senescence on gene expression and implications for the regulation of senescence in *Arabidopsis*. **Planta**, v. 224, n. 3, p. 556-568, 2006.
- PRASCH, C. M.; SONNEWALD, U. Signaling events in plants: stress factors in combination change the picture. **Environmental and Experimental Botany**, v. 114, p. 4-14, 2015.
- PRIMIANO, I. V., LOEHRER, M., AMORIM, L., SCHAFFRATH, U. Asian grapevine leaf rust caused by *Phakopsora euvitis*: an important disease in Brazil. **Plant Pathology**, v. 66, n. 5, p. 691-701, 2017.
- PRIMIANO, I. V.; AMORIM, L. Comparative study on the monocycle of *Phakopsora meliosmae-myrianthae* and *Phakopsora pachyrhizi*. **European Journal of Plant Pathology**, v. 157, n. 1, p. 151-162, 2020.
- PROTAS, J. F. da S.; CAMARGO, U. A. **Vitivinicultura brasileira: panorama setorial em 2010**. Embrapa Uva e Vinho-Livro técnico (INFOTECA-E), 2011.
- QUEIROZ-VOLTAN, R. B.; SOUZA ROLIM, G. D.; PEDRO JÚNIOR, M. J.; & HERNANDES, J. L. Variações na anatomia foliar de videira Niagara em diferentes sistemas de condução. **Bragantia**, v. 70, n. 3, p. 488-493, 2011.
- RASERA, J. B.; AMORIM, L.; MARQUES, J. P. R.; SOARES, M. K. M., & APPEZZATO-DA-GLÓRIA, B. Histopathological evidences of early grapevine leaf senescence caused by *Phakopsora euvitis* colonisation. **Physiological and Molecular Plant Pathology**, v. 108, p. 101434, 2019.
- RASERA, J. B.; AMORIM, L.; APPEZZATO-DA-GLÓRIA, B. Diverse effects of temperature on *in vivo* and *in vitro* germination of urediniospores of *Neophytopella tropicalis*. **European Journal of Plant Pathology**, v. 162, n. 2, p. 501-507, 2022.
- RAMEGOWDA, V., SENTHIL-KUMAR, M., ISHIGA, Y., KAUNDAL, A., UDAYAKUMAR, M., & MYSORE, K. Drought stress acclimation imparts tolerance to *Sclerotinia sclerotiorum* and *Pseudomonas syringae* in *Nicotiana benthamiana*. **International journal of molecular sciences**, v. 14, n. 5, p. 9497-9513, 2013

- RAMEGOWDA, V.; SENTHIL-KUMAR, M. The interactive effects of simultaneous biotic and abiotic stresses on plants: mechanistic understanding from drought and pathogen combination. **Journal of plant physiology**, v. 176, p. 47-54, 2015.
- SANCHEZ-RODRIGUEZ, L. A.; SPÓSITO, M. Bellato. Influence of the trellis/training system on the physiology and production of *Vitis labrusca* cv. Niagara Rosada in Brazil. **Scientia Horticulturae**, v. 261, p. 109043, 2020.
- SANTOS, R. F.; PRIMIANO, I. V.; AMORIM, L. Identification and pathogenicity of *Neophytophthora* species associated with Asian grapevine leaf rust in Brazil. **Plant Pathology**, v. 70, n. 1, p. 74-86, 2021.
- SCAPIN-BUFFARA, C. R., ANGELOTTI, F., DUFAULT, N. S., PEREIRA, C. B., & TESSMANN, D. J. Seasonal progression of leaf rust in 'Niagara Rosada' grapevine in a biannual crop system in Brazil. **European Journal of Plant Pathology**, p. 1-9, 2018.
- SCHULTZ, J. C.; APPEL, H. M.; FERRIERI, A. P.; & ARNOLD, T. M. Flexible resource allocation during plant defense responses. **Frontiers in plant science**, v. 4, p. 324, 2013.
- SENTELHAS, P. C. Aspectos climáticos para a viticultura tropical. **Informe Agropecuário**, v. 19, n. 194, p. 9-14, 1998.
- SHTIENBERG, D. Effects of foliar diseases on gas exchange processes: a comparative study. **Phytopathology**, v. 82, n. 7, p. 760-765, 1992.
- SINHA, R.; IRULAPPAN, V.; MOHAN-RAJU, B.; SUGANTHI, A.; & SENTHIL-KUMAR, M. Impact of drought stress on simultaneously occurring pathogen infection in field-grown chickpea. **Scientific reports**, v. 9, n. 1, p. 1-15, 2019.
- SINGH-SANGWAN, N. E. E. L. A. M.; ABAD FAROOQI, A. H.; & SINGH SANGWAN, R. Effect of drought stress on growth and essential oil metabolism in lemongrasses. **New Phytol**, Cambridge, v. 128, p. 173-179, 1994.
- SOUZA, C.R.; SOARES, A. M.; REGINA, M. A. Troca gasosa de mudas de videira, obtidas por dois porta-enxertos, submetidas à deficiência hídrica, **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v.36, n.10, p.21-30, 2001.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; & MURPHY, A. **Plant Physiology**. Fisiologia e desenvolvimento vegetal. 6º Ed. Porto Alegre: Artmed Editora, 858p. 2017.
- TANG, X.; ROLFE, S. A.; SCHOLLES, J. D. The effect of *Albugo candida* (white blister rust) on the photosynthetic and carbohydrate metabolism of leaves of *Arabidopsis thaliana*. **Plant, Cell & Environment**, v. 19, n. 8, p. 967-975, 1996.
- TECCHIO, J.F.S.; CAMARGO, U.A. Vitivinicultura brasileira: panorama setorial de 2010. Brasília: SEBRAE; Bento Gonçalves: IBRAVIN; Embrapa Uva e Vinho, 110 p., 2011.
- TESSMANN, D. J., DIANESE, J. C., GENTA, W., VIDA, J. B., MAY-DE MIO, L. L. Grape rust caused by *Phakopsora euvitidis*, a new disease for Brazil. **Fitopatologia Brasileira**, v. 29, n. 3, p. 338-338, 2004.
- TIPPMANN, H. F.; SCHLÜTER, U.; & COLLINGE, D. B. Common themes in biotic and abiotic stress signalling in plants. **Floriculture, ornamental and plant biotechnology**, p. 52-67, 2006.
- TIVOLI, B., CALONNEC, A., RICHARD, B., NEY, B., ANDRIVON, D. Current knowledge on plant/canopy architectural traits that reduce the expression and development of epidemics. **European Journal of Plant Pathology**, v. 135, n. 3, p. 471-478, 2013.

- VILE, D., PERVENT, M.; BELLUAU, M.; VASSEUR, F.; BRESSON, J.; MULLER, B.; ... & SIMONNEAU, T. *Arabidopsis* growth under prolonged high temperature and water deficit: independent or interactive effects?. **Plant, cell & environment**, v. 35, n. 4, p. 702-718, 2012.
- WINGLER, A.; ROITSCH, T. Metabolic regulation of leaf senescence: interactions of sugar signalling with biotic and abiotic stress responses. **Plant Biology**, v. 10, p. 50-62, 2008.
- ZHANG, H., SONNEWALD, U. Differences and commonalities of plant responses to single and combined stresses. **The Plant Journal**, v. 90, n. 5, p. 839-855, 2017.
- ZHAO, D.; GLYNN, N. C.; GLAZ, B.; COMSTOCK, J. C.; & SOOD, S. Orange rust effects on leaf photosynthesis and related characters of sugarcane. **Plant Disease**, v. 95, n. 6, p. 640-647, 2011.
- ZUFFEREY, V.; SPRING, J. L.; VERDENAL, T.; DIENES, A.; BELCHER, S.; LORENZINI, F.; ... & VIRET, O. The influence of water stress on plant hydraulics, gas exchange, berry composition and quality of Pinot Noir wines in Switzerland. **Oeno One**, v. 51, n. 1, 2017



## 2. EFEITO DA COBERTURA PLÁSTICA E DOS SISTEMAS DE CONDUÇÃO NA MORFO-FISIOLOGIA DE NIAGARA ROSADA E NO PROGRESSO TEMPORAL DE *Neophytophthora tropicalis*

### Resumo

A ferrugem da videira (*Neophytophthora tropicalis*) é uma importante doença nas regiões produtoras de uva de mesa no Brasil. Embora seja conhecido que os sistemas de condução e a cobertura plástica podem afetar o microclima e o desenvolvimento subsequente de doenças, não há informações elucidando os efeitos dessas técnicas no progresso temporal da ferrugem. O objetivo desse trabalho foi verificar os efeitos dos sistemas de condução, combinados ou não com o uso da cobertura plástica, na fisiologia da videira, na dispersão de esporos de *N. tropicalis* e no progresso temporal da doença. Experimentos de campo foram realizados na região de Piracicaba – SP, para caracterizar 15 epidemias da ferrugem durante as safras de 2014/2015 e 2019/20. Durante cada ciclo produtivo, os estádios fenológicos das plantas foram determinados de acordo com a escala BBCH. As epidemias se desenvolveram a partir de fonte de inóculo natural e/ou artificial, em diferentes sistemas de condução, com ou sem cobertura plástica. As curvas de progresso da doença foram ajustadas às funções de Richards. A estrutura epidêmica da ferrugem foi examinada pela análise de Componentes Principais (PC) e análise de Cluster, usando nove elementos de curva: parâmetro de forma do modelo de Richards ( $m$ ); incidência da doença no ponto de inflexão ( $DI_{tip}$ ), taxa absoluta média de aumento da doença ( $\rho$ ); tempo para atingir o ponto de inflexão ( $t_{ip}$ ); tempo para atingir DI de 0,05 ( $t_{0,05}$ ); área padronizada sob as curvas de progresso da incidência e severidade da ferrugem (iAUDPC e sAUDPC); severidade final da doença (DSF); e (j) área padronizada sob a curva de progresso das folhas remanescentes ( $AUC_{leaves}$ ). A dispersão dos urediniosporos de *N. tropicalis* foi monitorada através de armadilhas coletoras de esporos posicionadas a 1,8 m de altura da superfície do solo. A anatomia foliar das plantas cultivadas no sistema Y com e sem cobertura plástica foi caracterizada ao microscópio óptico, após coloração com azul de toluidina e Sudan IV. As epidemias foram caracterizadas por dois PCs, respondendo por 75% da variância total. O primeiro PC foi explicado por parâmetros relacionados a padrões de curva e quantidade de doença ( $\rho$ ,  $m$ ,  $DI_{tip}$ , DSF, sAUDPC, iAUDPC), e o segundo PC foi definido como um componente posicional ao longo do tempo ( $t_{ip}$  e  $t_{0,05}$ ). As epidemias conduzidas apenas por inóculo natural iniciaram mais tardiamente e foram organizadas em um grupo específico devido aos maiores valores de  $t_{ip}$  e  $t_{0,05}$ . Dependendo das safras, dois outros grupos foram formados baseados em epidemias com valores maiores ou menores de sAUDPC,  $\rho$  e DSF. Não foi possível verificar efeito direto dos sistemas de condução e da cobertura plástica no progresso temporal da ferrugem. O desenvolvimento da epidemia esteve relacionado ao tipo de disponibilidade de inóculo e diferentes condições climáticas ao longo das safras. No entanto, a cobertura plástica reduziu a dispersão dos esporos de *N. tropicalis* em pelo menos duas safras e prolongou o ciclo produtivo de videiras, retardando a queda das folhas. Folhas de plantas cultivadas sob cobertura plástica apresentaram menor espessura do limbo foliar, cutícula e parede celular.

**Palavras-chave:** *Neophytopella tropicalis*; Cobertura plástica; *Vitis labrusca*; Epidemiologia quantitativa; Análise multivariada.

## Abstract

Grapevine leaf rust (*Neophytopella tropicalis*) is one of the most destructive diseases present in table grape producing regions in Brazil. Although it is known that the training systems and plastic cover can affect the microclimate and the subsequent development of diseases, there is no information elucidating the effects of these techniques on the temporal progress of *N. tropicalis*. Therefore, the objective of this study was to verify the effects of the training systems, combined or not with the use of plastic covering, on the grapevine physiology, on the dynamics of airborne spore dispersion and on the temporal progress of the disease. Field experiments were carried out in Piracicaba - SP, to characterize 15 grapevine rust epidemics during the 2014/2015 and 2019/20 seasons. The main phenological stages of the plants were determined according to the BBCH scale, during every production cycle. Epidemics developed from natural and/or artificial inoculum sources, in different training systems, with or without plastic cover. The disease progress curves were fitted to Richard's functions. The grapevine leaf rust epidemic structure was examined by multivariate principal components (PC) and cluster analyses, using nine curve elements: Richard's shape parameter ( $m$ ); disease incidence at the inflection point ( $DI_{ip}$ ), mean absolute rate of disease increase ( $\rho$ ); time to reach the inflection point ( $t_{ip}$ ); time to reach 0.05 DI ( $t_{0.05}$ ); standardized area under the disease incidence and severity progress curves (iAUDPC and sAUDPC); final disease severity (DSF); and (j) standardized area under the remaining leaves progress curve ( $AUC_{leaves}$ ). The urediniospores dispersion of *N. tropicalis* was monitored using spore traps positioned 1.8 m above the soil surface. The leaf anatomy of plants grown in the Y system with and without plastic cover was characterized under an optical microscope, after staining with toluidine blue and Sudan IV. The epidemics were characterized by two PCs, accounting for 75% of the total variance. The first PC was loaded heavily in parameters related to curve patterns and disease amount ( $\rho$ ,  $m$ ,  $DI_{ip}$ , DSF, sAUDPC, iAUDPC), and the second PC was defined as a positional component over time ( $t_{ip}$  and  $t_{0.05}$ ). Epidemics started later when driven only by natural inoculum and were arranged into one particular group. Depending on the seasons, two other groups were formed based on epidemics with higher or lower values of sAUDPC,  $\rho$ , and DSF. It was not possible to verify a direct effect of the different training systems and the plastic covering on the temporal progress of grapevine leaf rust. Our results showed that epidemic development was related mainly to the type of inoculum availability and different climatic conditions throughout the seasons. However, the plastic cover reduced *N. tropicalis* spore dispersion in at least two evaluated seasons and extended plants productive cycle's, delaying the leaves senescence. Leaves of plants grown under plastic cover presented thinner leaf blade, cell wall and cuticles.

**Key words:** *Neophytopella tropicalis*; Plastic covering; *Vitis labrusca*; Quantitative epidemiology; Multivariate analysis.

## 2.1 Introdução

A videira (*Vitis* spp.) é uma das frutíferas mais importantes do mundo. No Brasil a videira é plantada em uma área de 75.007 ha com uma produção anual de 1,6 milhão de toneladas (IBGE, 2021). A uva é a terceira fruta mais produzida e exportada no Brasil, e as uvas de mesa representam 48,6% da produção de videiras (ANUARIO BRASILEIRO DE FRUTICULTURA, 2021; IEA, 2020). Uma das cultivares de uva de mesa mais amplamente distribuída é a 'Niagara Rosada' (*V. labrusca*), que corresponde por aproximadamente 92% das plantas e 33% da produção de uva de mesa no Estado de São Paulo (IBGE 2021; IEA, 2020).

Os sistemas de condução adotados pelos viticultores influem na arquitetura da planta e nas condições microclimáticas. Em alguns casos, o sistema de condução ajuda a reduzir a incidência de diferentes patógenos fúngicos foliares (CHAVARRIA et al., 2007; DE BEM et al., 2016, 2017; PEDRO JÚNIOR et al., 2011). O sistema de condução mais utilizado para a produção de 'Niagara Rosada' é o espaldeira (*Vertical Shoot Position* – VSP), porém, o sistema de treliça em forma de Y (*Y trellis system* - YT) facilita o uso de cobertura plástica, permitindo o cultivo da videira em ambientes protegidos. No sistema VSP, os ramos são conduzidos verticalmente, proporcionando um incremento na incidência de luz e ventilação nas copas das videiras. No sistema YT, os ramos são conduzidos de forma inclinada, em ângulos de 120°, contribuindo para uma maior área para o crescimento dos ramos (SANCHEZ-RODRIGUEZ; SPÓSITO, 2020). O YT concomitante com cobertura plástica (*Y trellis system with plastic cover* - YT-PC) vem se expandindo para a produção de uvas de mesa devido ao alto rendimento e boa qualidade dos frutos, promovidos pela redução do impacto das chuvas e da radiação solar (PEDRO JÚNIOR et al., 2011; SANCHEZ-RODRIGUEZ et al., 2020). Além disso, já foi observado que esta técnica auxiliou na redução do período de duração do molhamento em folhas e frutos, consequentemente reduzindo a incidência do míldio (*Plasmopara viticola*) e da antracnose (*Elsinoe ampelina*) da videira (BATISTA et al., 2015; CHAVARRIA et al., 2007; PEDRO JÚNIOR et al., 2011). Nesse mesmo contexto, a redução da velocidade do vento promovida pela cobertura plástica também pode auxiliar a interceptação do inóculo, diminuindo a concentração e deposição de esporos fúngicos nas folhas (BATISTA et al. 2015).

A ferrugem da videira é uma doença destrutiva e amplamente distribuída, especialmente nos trópicos (PRIMIANO et al., 2017). Os sintomas característicos da doença são pústulas amarelo-alaranjadas contendo urediniosporos na face abaxial das folhas, correspondendo à área de lesões cloróticas na face adaxial. Quando as pústulas estão densamente agregadas, o tecido foliar entre as lesões coalesce, tornando-se seco e necrótico (PRIMIANO et al., 2019). Folhas com alta severidade da doença caem prematuramente,

prejudicando o acúmulo de carboidratos nas raízes (ANGELOTTI et al. 2008a; NOGUEIRA JÚNIOR et al. 2017; PRIMIANO et al., 2017; SCAPIN-BUFFARA et al., 2018). A maioria das cultivares de *V. vinifera* e *V. labrusca*, incluindo ‘Niagara Rosada’, são suscetíveis ao patógeno (ANGELOTTI et al., 2008a; HENNESSY et al., 2007).

A ferrugem da videira foi relatada pela primeira vez no Brasil em 2001, e desde então tem sido descrita em várias regiões, sendo atualmente considerada endêmica no País (PRIMIANO et al., 2017; TESSMANN et al., 2004). Essa doença é causada por diferentes espécies do gênero *Neophytopella* (anteriormente classificado como *Phakopsora*) (JI et al., 2019; ONO, 2000). No Brasil, a espécie *N. tropicalis* é a mais frequentemente associada à doença, principalmente na região centro-sul (SANTOS et al., 2021). Como o hospedeiro alternativo *Meliosma myriantha* não está presente no Brasil, os uredinósporos no ar são a única fonte de inóculo primário. Temperaturas entre 15 a 30°C e uma duração de molhamento foliar de 6 horas são necessárias para a infecção por *N. tropicalis* (ANGELOTTI et al., 2014; RASERA et al., 2022).

O sistema de produção de ‘Niagara Rosada’ é tradicionalmente caracterizado por podas curtas realizadas no final do inverno (julho/agosto), com colheita prevista no final da primavera e início do verão (dezembro/janeiro). No entanto, o clima quente e seco de algumas regiões brasileiras possibilita um ciclo adicional com podas no final do outono e início do inverno (maio a junho) (COSTA et al., 2012; HERNANDES et al., 2011; TECCHIO et al., 2011). Como resultado, a sobrevivência de *N. tropicalis* e o acúmulo de inóculo podem ser favorecidos pela presença de folhas de videira que crescem ativamente ao longo do ano (PRIMIANO et al., 2017; Tessmann et al., 2004). Além da fonte e densidade do inóculo, as epidemias de ferrugem também dependem das condições climáticas e da arquitetura do dossel (TIVOLI et al., 2013; VAN MAANEN; XU, 2003).

O sucesso das epidemias de doenças depende da pressão inicial do inóculo e das condições climáticas, mas também da dinâmica da arquitetura do dossel e da suscetibilidade do hospedeiro à infecção. Para melhor compreensão e comparação das epidemias, é necessário conhecer os elementos que compõem as estruturas das próprias epidemias (KRANZ, 1974). Esta informação pode ser quantificada usando modelos de regressão não-linear (MADDEN et al., 2007). Além disso, técnicas multivariadas, como análise de cluster ou análise de componentes principais, têm sido usadas para caracterizar a estrutura de epidemias em diferentes patossistemas em estudos de epidemiologia comparativa e parecem ser apropriadas para detectar semelhanças entre elementos de curvas de doenças (CAMPBELL et al., 1980 ;

MADDEN; PENNYPACKER et al. 1980; MORA-AGUILERA et al., 1993; NAVAS-CORTÉS et al., 1998; MOHAPATRA et al., 2013).

Embora *N. tropicalis* esteja presente no Brasil há quase duas décadas, os efeitos do ambiente, da disponibilidade de inóculo e de diferentes sistemas de condução da videira, especialmente sob cobertura plástica, nas epidemias de ferrugem ainda não foram elucidados. O conhecimento de tais práticas nas epidemias de ferrugem pode permitir um melhor manejo da doença. Portanto, o objetivo deste estudo foi avaliar o progresso temporal da ferrugem da videira e a dinâmica de dispersão dos esporos de *N. tropicalis* em diferentes sistemas de condução e safras, a partir de fontes de inóculo natural e/ou artificial.

## 2.2 Materiais e métodos

### 2.2.1 Descrição da área experimental e tratos culturais

O experimento foi realizado no município de Piracicaba, Estado de São Paulo, Brasil (22°42'34" S, 47°37'38" W, a uma altitude de 546 m acima do nível do mar) e teve início, com estudos realizados por Camargo (2017), na safra de primavera-verão de 2014/2015 (Tabela 1). Para dar continuidade ao experimento, foram avaliadas outras safras consecutivas, sendo elas, outono-inverno de 2018, primavera-verão de 2018/2019 e primavera-verão de 2019/2020 (Tabela 1).

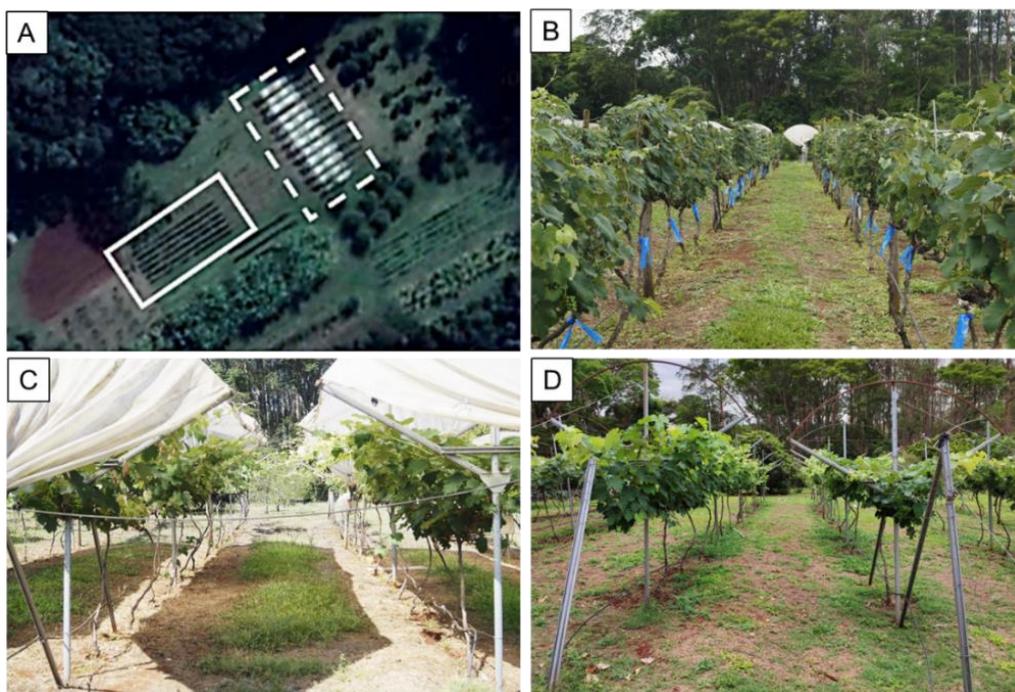
**Tabela 1-** Safras de ‘Niagara Rosada’ em que foram conduzidos os experimentos no município de Piracicaba - SP, Brasil.

Safras	Ciclo produtivo	Referência
Primavera-verão 2014/2015	13/ago - 27/fev	Camargo (2017)
Primavera-verão 2015/2016	12/ago - 04/mar	Camargo (2017)
Primavera-verão 2016/2017	10/ago - 18/mar	Camargo (2017)
Outono-inverno 2018	06/mar - 27/ago	presente estudo
Primavera-verão 2018/2019	29/ago - 25/mar	presente estudo
Primavera-verão 2019/2020	15/ago - 09 mar	presente estudo

As plantas da cv. ‘Niagara Rosada’ (*Vitis labrusca*) enxertadas sobre cv. ‘IAC 766 Campinas’ (*V. riparia* x *V. caribaea*) foram conduzidas em espaldeira (*Vertical Shoot Position* - VSP), sistema em Y (*Y trellis system*- YT) e sistema em Y associado a cobertura plástica (*Y trellis system with plastic cover* - YT-PC). As mudas de ‘Niagara Rosada’ foram implantadas em 2011, e a instalação dos sistemas VSP e YT ocorreu em 2013. Em 2015, a área formada por plantas em YT foi dividida em duas partes e a cobertura plástica foi instalada em uma delas. A

parcela experimental conduzida em VSP foi formada por seis linhas com espaçamentos de 2 m entre linhas e 1 m entre plantas. Nas parcelas do sistema YT e YT-PC, foram utilizados espaçamentos de 3,2 m entre linhas e 1,2 m entre plantas, sendo a área experimental constituída por 12 linhas. As duas plantas no final de cada linha e as plantas nas linhas limítrofes foram consideradas bordaduras (Fig. 1).

**Figura 1.** Área experimental localizada em Piracicaba, Brasil (A). Plantas de ‘Niagara Rosada’ conduzidas em diferentes sistemas de condução: Espaldeira (VSP) (B), Y com cobertura plástica (YT-PC) (C) e Y descoberto (YT) (D). Em (A), as linhas contínuas indicam a área contendo as plantas no sistema VSP e as linhas tracejadas indicam a área com plantas conduzidas em YT e YT-PC.



Fonte: Google Earth (A) e o autor (B-D).

Na safra outono-inverno de 2018, a poda de produção foi realizada no dia 06/03/18, deixando quatro gemas por ramo (poda longa). Nas safras primavera-verão 2018/2019 e 2019/2020, a poda foi realizada nos dias 29/08/18 e 15/08/19, respectivamente, deixando duas gemas por ramo (poda curta). Após a poda, a brotação das gemas foi estimulada pelo tratamento com solução de cianamida hidrogenada (Dormex®, 5%). A adubação foi realizada de acordo com a análise do solo, visando produtividades entre 13 e 22 toneladas/ha (TECCHIO et al., 2012). Para cada sistema de condução, o desponste foi realizado logo após os ramos atingirem o último fio de arame de sustentação. O controle do míldio foi realizado a cada 15 dias alternando os fungicidas Revus® (25% mandipropamida, Syngenta SA) e Ridomil Gold MZ® (4% metalaxil-M+ 64% mancozebe, Syngenta SA), nas doses recomendadas pelo fabricante.

As videiras foram irrigadas por gotejamento e a irrigação foi ajustada considerando a evapotranspiração máxima da cultura de 4 mm/dia.

### **2.2.2 Estágios fenológicos de videiras nos diferentes sistemas de condução e sob cobertura plástica**

Os principais estádios fenológicos das videiras foram monitorados nos três sistemas de condução, durante todos os ciclos de produção, e foram determinados de acordo com a escala fenológica BBCH (*Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt und Chemische Industrie*) (LORENZ et al., 1995).

### **2.2.3 Caracterização da anatomia foliar de plantas de ‘Niagara Rosada’ desenvolvidas sob cobertura plástica**

Para o estudo da anatomia foliar, foram coletadas 10 folhas sadias de ‘Niagara Rosada’ nos sistemas de condução YT e YT-PC. As folhas foram coletadas do terço médio dos ramos durante o estágio de maturação dos frutos, nas safras primavera-verão de 2018/2019 e 2019/2020.

Para as análises sob microscopia de luz, amostras de 0,5 cm<sup>2</sup> retiradas de cada folha foram fixadas em solução de Karnovsky (KARNOVSKY, 1965) e levadas a uma bomba de vácuo para a remoção do ar contido nos tecidos. Posteriormente, os tecidos foliares das amostras foram desidratados em álcool etílico (10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 e 100%) e infiltrados em hidróxi-etil-metacrilato (Leica Historesin®), conforme recomendado pelo fabricante. As amostras foram emblocadas e, para cada amostra foliar, foram obtidas nove secções transversais de 7 µm de espessura, realizadas em micrótomo rotatório Leica RM 2045. Para a análise anatômica geral da lâmina foliar, as secções foram coradas com azul de toluidina 0,05% em tampão fosfato-citrato a pH 4-6 e confeccionadas em resina sintética “Entellan”. Para medição da espessura da cutícula, as secções foram coradas com Sudan IV glicerinado. Para cada secção, foi obtida imagens digitais com auxílio de um microscópio Zeiss AX10, equipado com acessório fotográfico AxioCam 503 color. A partir da captura de imagens, foi realizada a medição, utilizando o software ZEN lite 2012, das seguintes espessuras (µm): lâmina foliar, mesofilo, epiderme (adaxial e abaxial), parênquimas (paliçádico e lacunoso), parede periclinal externa (adaxial e abaxial) e cutícula (adaxial e abaxial). Foram consideradas três medições de cada secção transversal, totalizando 18 medições por amostra.

Para determinação do índice estomático e densidade estomática, as amostras de 0,5 cm<sup>2</sup> retiradas de cada folha previamente fixadas foram desidratadas em uma série de etílica (30, 50, 70, 90 e 100%). Após desidratação, os fragmentos vegetais foram submetidos à secagem no

ponto crítico (Leica® EM CPD 300). Para metalização com ouro, as amostras foram colocadas sobre fita adesiva dupla face de carbono e fixadas sobre suportes metálicos de alumínio. As amostras foram examinadas no microscópio eletrônico de varredura JEOL JSM-IT300 LV SEM (Jeol Ltd., Tokyo, Japan), operado a 10 Kv para a obtenção das eletromicrografias. Em cada amostra foram contados três campos onde cada campo de visão tinha 0,45 mm<sup>2</sup>. A densidade estomática da face abaxial (n° estômatos/ mm<sup>2</sup>) e o índice estomático foram obtidos com o auxílio do software ImageJ. O índice estomático foi determinado de acordo com a Eq. 1:

$$IE = \frac{NE}{CE+NE} \cdot 100 \quad (1)$$

em que, IE = índice estomático, NE = número de estômatos e, CE = número de células epidérmicas.

#### **2.2.4 Dinâmica dos urediniósporos de *Neophysopepla tropicalis* sob cobertura plástica**

Armadilhas caça-esporos do tipo "catavento" foram distribuídas na área experimental a fim de monitorar a dinâmica dos urediniósporos presentes na área. Para isso, quatro armadilhas foram instaladas no sistema de condução em YT e outras três no sistema YT-PC. As armadilhas foram posicionadas a 1,8 m de altura da superfície do solo (Fig. 2). Cada uma das armadilhas caça-esporos continha uma lâmina de vidro coberta com fita adesiva dupla face na superfície exposta com o intuito de reter os esporos coletados (Fig. 2C). As trocas das lâminas foram efetuadas semanalmente ao longo das safras outono-inverno de 2018, primavera-verão de 2018/2019 e primavera-verão 2019/2020. A contagem dos urediniósporos aderidos às lâminas de vidro foi realizada em microscópio óptico (400x).

**Figura 2.** Armadilha caça-esporo tipo catavento instalada no campo experimental, Piracicaba – SP (A). Visão lateral (B) e interior (C) da armadilha caça-esporo.



Fonte: O autor

### 2.2.5 Monitoramento das variáveis meteorológicas

As seguintes variáveis meteorológicas foram monitoradas durante cada ciclo da cultura: (a) temperatura média do ar ( $T_{med}$ , °C); (b) temperatura mínima do ar ( $T_{min}$ , °C); (c) temperatura máxima do ar ( $T_{max}$ , °C); (d) umidade relativa (UR, %); (e) precipitação pluviométrica (PPT, mm); (f) duração do período de molhamento foliar (DPM, h) e (g) temperatura foliar ( $T_{folha}$ , °C). Os dados meteorológicos em escala diária de  $T_{med}$ ,  $T_{min}$ ,  $T_{max}$ , UR e PPT foram obtidos a partir do banco de dados da estação meteorológica automática "Professor Jesus Marden dos Santos" localizada no campus da ESALQ/USP, em Piracicaba, SP. Para determinar a DPM, cada sistema de condução foi equipado com um *datalogger* contendo cinco sensores de molhamento foliar (Campbell Scientific Inc., modelo Decagon LWS) dispostos em diferentes posições do dossel vegetativo. A DPM foi obtida a partir do valor médio diário coletado de todos os sensores em cada uma das áreas.

A temperatura foliar ( $T_{folha}$ ), foi determinada pela medição de 15 plantas do YT e 15 plantas do YT-PC, avaliando-se quatro folhas por planta (uma do terço superior, duas do terço médio e uma do terço inferior). As medições foram realizadas semanalmente nas safras primavera-verão de 2018/2019 e de 2019/2020 nos períodos de 31/10/2018 a 09/02/2019 e de 22/11/2019 a 07/01/2020, respectivamente. As medidas foram obtidas a partir de um termômetro infravermelho (IncoTerm®) nos seguintes horários do dia: 7:00, 10:00, 14:00, 18:00 e 21:00 horas.

### 2.2.6 Análise do progresso temporal da ferrugem da videira

Para obter informações mais precisas e conclusivas da análise temporal das epidemias de ferrugem, foram utilizados, além dos dados obtidos nas safras do presente trabalho (outono-inverno de 2018, primavera-verão de 2018/2019 e primavera-verão de 2019/2020), dados obtidos durante outras três safras anteriores (primavera-verão de 2014/2015, 2015/2016 e 2016/2017). Os dados originais dessas safras estão disponíveis na tese de Meyrielle Pires de Camargo (CAMARGO, 2017) e foram utilizados com a anuência da autora e de sua orientadora, Profa. Lilian Amorim.

As avaliações de incidência e severidade da ferrugem foram realizadas semanalmente, logo após o desponte, em todas as folhas de cada ramo previamente estabelecido. A incidência da ferrugem foi definida como o número de folhas com sintomas dividido pelo número total de folhas de cada ramo avaliado. A severidade da doença foi definida como a proporção da área foliar doente (ocupada por pústulas do patógeno) e foi estimada usando uma escala diagramática (Angelotti et al., 2008b). A severidade foi estimada em cada folha e foi expressa pela severidade média das folhas por ramo avaliado.

Nas três primeiras safras primavera-verão (2014/2015, 2015/2016, 2016/2017), foram selecionadas aleatoriamente 42, 36 e 30 plantas em VSP, YT e YT-PC, respectivamente. A doença foi avaliada em um ramo por planta, considerando as quatro folhas do meio em cada ramo. As epidemias nessas safras se desenvolveram no campo a partir de fonte de inóculo natural (NI). Durante a safra primavera-verão de 2015/2016, as plantas do sistema YT apresentaram alta severidade de míldio, o que prejudicou a avaliação da ferrugem (Camargo, 2017).

Para as safras outono-inverno de 2018 e primavera-verão de 2018/2019 e 2019/2020, foram selecionadas aleatoriamente 60 plantas em VSP, 30 plantas em YT e 30 plantas conduzidas em YT-PC. As avaliações da doença foram realizadas em todas as folhas considerando um ramo por planta em VSP e dois ramos opostos por planta nos sistemas YT e YT-PC. Além da fonte de inóculo natural, uma fonte de inóculo artificial (IA) foi mantida em campo para iniciar epidemias durante essas estações.

Para manter artificialmente inóculo no campo, seis plantas envasadas inoculadas artificialmente com *N. tropicalis* foram dispostas aleatoriamente na área experimental e trocadas em intervalos de 14 dias, desde meados de abril (safra outono-inverno) e meados de outubro (safras primavera-verão) até a colheita. Estas plantas foram inoculadas conforme descrito por Primiano et al. (2019). Resumidamente, a inoculação foi realizada pulverizando uma suspensão de esporos ( $10^5 \times 10$  esporos/ml) de *N. tropicalis* na superfície abaxial das folhas

de plantas sadias. As plantas foram mantidas em câmara úmida, no escuro, por 24 horas a temperatura de 25°C e então transferidas para uma câmara de crescimento (Conviron®, Winnipeg, Canadá) a 25°C, com fotoperíodo de 12 horas. Depois do aparecimento dos sintomas iniciais (7~10 dias), as mudas foram transferidas para a área experimental.

### 2.2.7 Análise estatística

Os caracteres anatômicos foliares e a área padronizada abaixo da curva do número acumulado de esporos ( $AUC_{\text{spores}}$ ) foram e comparados entre os sistemas YT e YT-PC pelo teste- $t$  ( $P>0,05$ ). Os valores de  $AUC_{\text{spores}}$  foram calculados por integração trapezoidal e padronizados pelos dias após a poda (MADDEN et al., 2007). O teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade, foi realizado para comparar as variáveis meteorológicas entre as safras.

As curvas de evolução da incidência da doença foram obtidas a partir da incidência acumulada da doença ao longo do tempo, em dias após a poda (DAP). Os dados de todas as curvas de progresso de incidência foram ajustados ao modelo de Richards, usando análise de regressão não-linear (MADDEN et al., 2007). O modelo de Richards está escrito na Eq. 2–3:

$$DI(t) = k \cdot [(1 - B)^{-r \cdot t}]^{\frac{1}{1-m}}, \text{ quando } m < 1 \quad (2)$$

$$DI(t) = k \cdot [(1 + B)^{-r \cdot t}]^{\frac{1}{1-m}}, \text{ quando } m > 1 \quad (3)$$

em que, DI = incidência da doença,  $K$  = parâmetro da assíntota,  $B$  = constante de integração,  $r$  = taxa de progresso da doença,  $m$  = parâmetro de forma e,  $t$  = dias após a poda. Foram utilizados os valores médios de incidência (DI ramos com folhas sintomáticas/número total de ramos por parcela). O procedimento do programa de mínimos quadrados para modelos não-lineares (NLIN) do SAS (versão 9.4, SAS Institute Inc., Cary, NC), com o método de compromisso de Marquardt, foi usado para obter estimativas dos parâmetros  $K$ ,  $B$  e  $r$ . O coeficiente de determinação ( $R^2$ ), o teste de Fisher (F), o erro quadrático médio, os erros padrão associados às estimativas dos parâmetros e o padrão dos resíduos padronizados plotados em relação aos valores previstos ou à variável independente foram aplicados para verificar a qualidade do ajuste (MADDEN et al. 2007; NAVAS-CORTÉS et al. 1998). Um parâmetro de forma ( $m$ ) igual a 2 indica que as curvas são simétricas e assumem uma verdadeira função logística. A função de Richards não é definida quando  $m = 1$ , embora quando  $m$  se aproxima de 1, ela se aproxima da função de Gompertz. A função de Richards assume a função monomolecular quando  $m$  é igual a 0.

As seguintes variáveis foram usadas para caracterizar epidemias da ferrugem da videira: o parâmetro de forma da função de Richards ( $m$ ); a incidência da doença no ponto de inflexão ( $DI_{tip}$ ); a taxa absoluta média ponderada de aumento da doença ( $rho$ ); o tempo necessário para atingir o ponto de inflexão ( $t_{ip}$ ); o tempo necessário para atingir um nível de incidência de 0,05, como uma estimativa dos sintomas iniciais ( $t_{0,05}$ ); a área padronizada sob a curva de progresso da incidência ( $iAUDPC$ ); a área padronizada sob a curva de progresso da severidade ( $sAUDPC$ ); a severidade da doença na data final da avaliação ( $DSF$ ) e a área padronizada sob a curva de progresso das folhas remanescentes ( $AUC_{leaves}$ ). A  $AUC_{leaves}$  foi calculada com base na proporção de folhas remanescentes durante as avaliações em relação ao número máximo de folhas em cada sistema de condução.  $DI_{tip}$  e  $t_{ip}$  e  $rho$  foram obtidos pelos parâmetros estimados pela função de Richards, dados pelas Eqs. 4–7 (MADDEN et al., 2007; NAVAS-CORTÉS et al., 1998). A estimação de  $rho$  é necessária uma vez que as curvas ajustadas ao modelo de Richards possuem valores diferentes dos parâmetros  $K$ ,  $m$  e  $r$  e não podem ser comparadas diretamente. Os valores de  $sAUDPC$ ,  $iAUDPC$  e  $AUC_{leaves}$  foram calculados por integração trapezoidal (MADDEN et al., 2007) e padronizados pelos dias após a poda (DAP).

$$DI_{tip} = K \cdot m^{\frac{1}{1-m}} \quad (4)$$

$$t_{ip} = [\ln B - \ln (1 - m)]. r^{-1} \text{ quando } m < 1 \quad (5)$$

$$t_{ip} = [\ln B - \ln (m - 1)]. r^{-1} \text{ quando } m > 1 \quad (6)$$

$$rho = \frac{K \cdot r}{2m+2} \quad (7)$$

Primeiramente, as correlações de Pearson foram calculadas para analisar as relações entre as variáveis contínuas mencionadas acima. Em seguida, foi realizada uma análise de cluster hierárquica usando a distância euclidiana. O método de Ward foi usado para agrupar os tratamentos com base em suas características epidêmicas. O teste não paramétrico de Kruskal-Wallis ( $P \leq 0,05$ ) foi realizado para testar as diferenças entre os grupos a partir das variáveis descritas. Além disso, uma Análise de Componentes Principais (PCA) foi usada para extrair a variância máxima dos dados com apenas alguns componentes que simplificaram a interpretação das inter-relações entre safras e sistemas de condução (JOLLIFFE, 2002). O primeiro PC explicou a maior quantidade de variação nos dados originais, o segundo explicou a segunda maior quantidade de variação e assim por diante. O número de componentes principais foi

definido com base na variância acumulada ( $\geq 70\%$ ) e autovalores ( $\geq 1,0$ ) (NASERI; SABETI, 2021). PC3 e PC4 foram excluídos da análise de regressão devido a um autovalor  $< 1,0$ .

As análises de cluster e PCA foram realizadas utilizando os pacotes FactoMineR (LÊ et al., 2008) e factorextra (KASSAMBARA; MUNDT, 2017); enquanto os teste-*t*, Kruskal-Wallis e Scott-Knott foram realizados com o auxílio do pacote agricolae (DE MENDIBURU, 2019), no software R versão 4.1.1 (R Core Team, 2021).

Todas as análises estatísticas referentes às curvas de progresso da doença, PCA e análise de cluster incluíram, além dos dados obtidos do presente trabalho, os dados obtidos no trabalho de Camargo (2017).

## **2.3 Resultados**

### **2.3.1 Estágios fenológicos de videiras nos diferentes sistemas de condução e sob cobertura plástica**

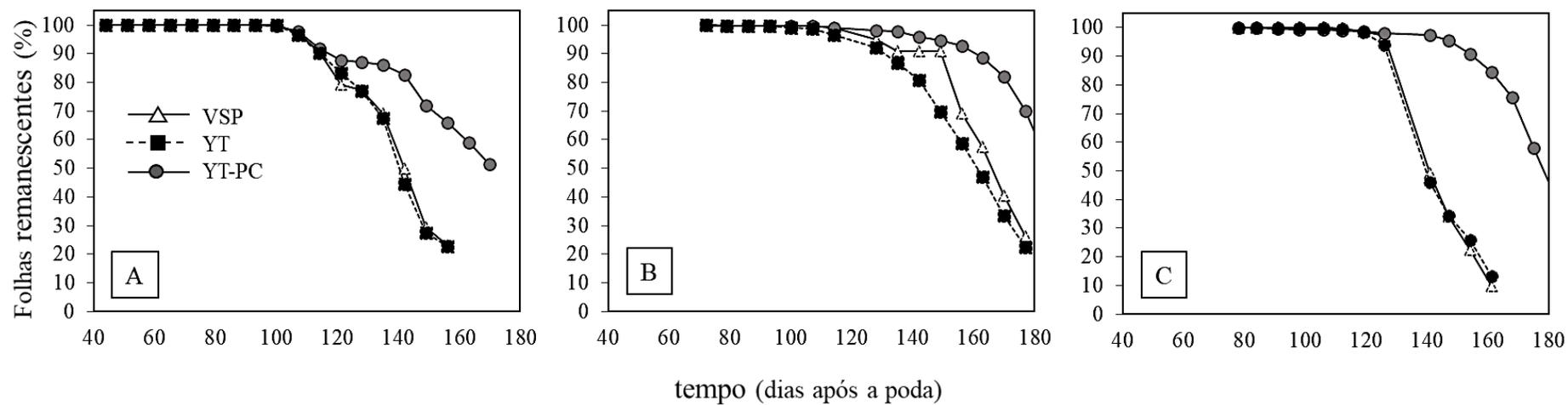
Os estádios fenológicos das plantas de videira, até a fase de colheita, ocorreram em tempos semelhantes após a poda nos diferentes sistemas de condução e nas três safras avaliadas. A colheita das safras outono-inverno 2018, primavera-verão 2018/2019 e primavera-verão 2019/2020 ocorreram aos 121 DAP, 128 DAP, e aos 123 DAP, respectivamente (Tabela 2). As principais diferenças foram observadas a partir do estágio de senescência foliar/desfolha. Na safra outono-inverno de 2018, intensa desfolha foi observada aos 142 DAP nos sistemas VSP e YT, enquanto no sistema YT-PC, essa fase ocorreu aos 149 DAP. Semelhantemente, nas safras de primavera-verão 2018/2019 e 2019/2020, a fase de intensa de desfolha ocorreu antecipadamente nos sistemas VSP e YT em relação ao YT-PC (Tabela 2). Na safra primavera-verão 2019/2020, aos 161 DAP, as plantas conduzidas em YT-PC possuíam 84,49% de suas folhas remanescentes enquanto que apenas 9,73 e 13,17% de folhas remanescentes eram observadas no sistema em VSP e YT, respectivamente (Fig. 3). A cobertura plástica retardou a desfolha das plantas nas três safras avaliadas e, conseqüentemente, o final do ciclo no sistema YT-PC foi prolongado entre 17 e 32 dias em relação aos ciclos das plantas conduzidas sem a cobertura plástica (VSP e YT) (Tabela 2).

**Tabela 2** – Principais fases fenológicas da videira determinadas de acordo com a escala fenológica BBCH (Lorenz et al., 1995).

Fases fenológicas	Safrá outono-inverno 2018				Safrá primavera-verão 2018/2019				Safrá primavera-verão 2019/2020			
	datas	DAP <sup>1</sup>			datas	DAP			datas	DAP		
		VSP	YT	YT-PC		VSP	YT	YT-PC		VSP	YT	YT-PC
00 - Poda	06/mar	0	0	0	29/ago	0	0	0	15/ago	0	0	0
08 - Brotação	20/mar	14	14	14	21/set	23	23	23	02/set	18	18	18
60 - Florescimento	10/abr	35	35	35	10/out	42	42	42	09/set	25	25	25
71 - Frutificação	18/abr	43	43	43	17/out	49	49	49	01/out	47	47	47
79 - Compactação dos cachos	23/abr	48	48	48	09/nov	72	72	72	24/out	63	70	70
89 - Maturação dos frutos	25/jun	111	111	111	07/dez	100	100	100	05/dez	112	112	112
Colheita	05/jul	121	121	121	04/jan	128	128	128	16/dez	123	123	123
93 - Início queda das folhas	05/jul	121	121	121	04/jan	128	128	128	19/dez	126	126	147
95- Senescência/ desfolha	26/jul	142	142	149	01/fev	156	163	177	03/jan	141	141	187
97 - Final do ciclo	09/ago	156	156	174	22/fev	177	177	208	06/fev	175	175	207

<sup>1</sup> DAP = dias após a poda; VSP = espaldeira; YT = sistema em Y e; YT-PC= sistema em Y com cobertura plástica.

**Figura 3.** Desfolha de ‘Niagara Rosada’ entre os sistemas de condução durante as safras de outono-inverno 2018 (A), primavera-verão 2018-2019 (B) e primavera-verão 2019/2020 (C).

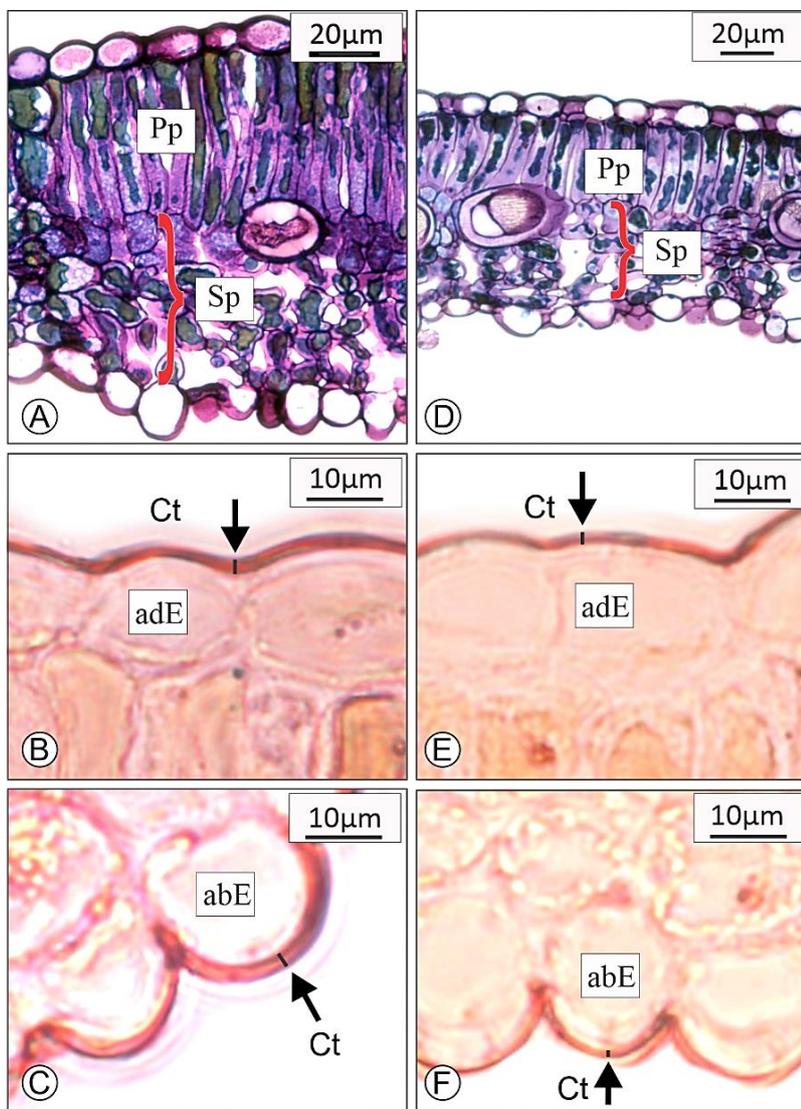


Fonte: O autor.

### 2.3.2 Caracterização da anatomia foliar de plantas de ‘Niagara Rosada’ desenvolvidas sob cobertura plástica

A partir dos cortes transversais do limbo de ‘Niagara Rosada’ foi possível observar a epiderme uniestratificada, o mesofilo de simetria dorsiventral e o parênquima paliçádico com apenas uma camada de células, independentemente da safra ou sistema de condução (Fig. 4).

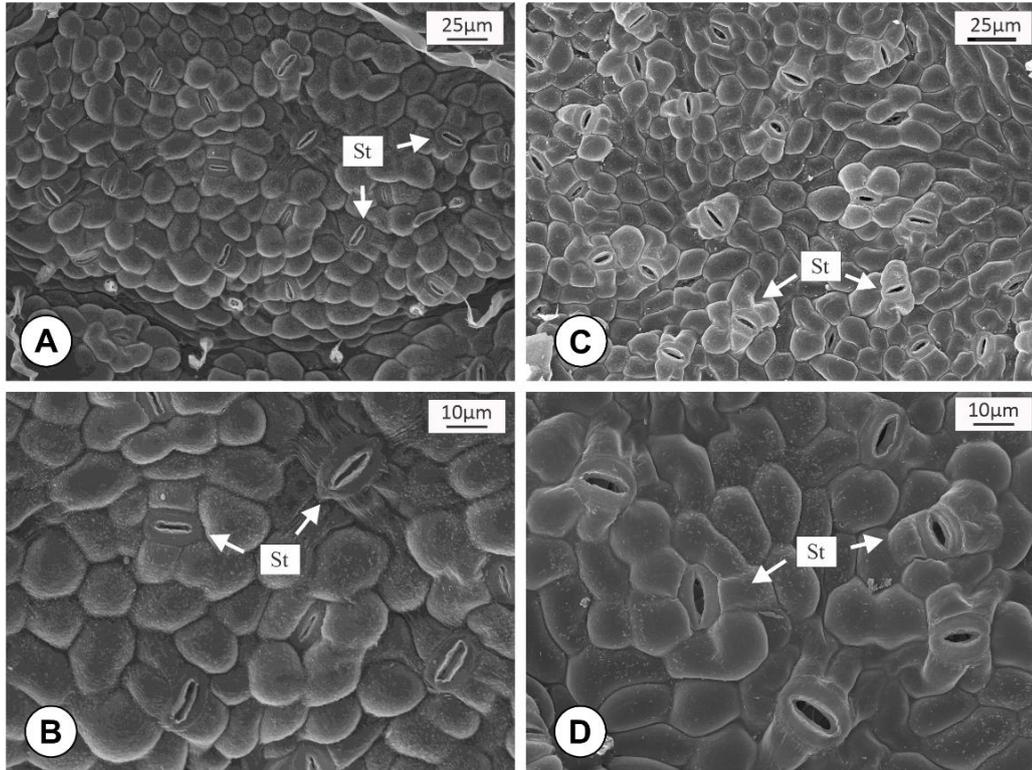
**Figura 4.** Cortes transversais do limbo de ‘Niagara Rosada’ conduzidas em diferentes sistemas de condução. A-C: Niagara Rosada conduzida em Y sem cobertura plástica (YT). D- F: Niagara Rosada conduzida em Y com cobertura plástica (YT-PC). Pp= Parênquima paliçádico; Sp= Parênquima lacunoso; adE= Epiderme adaxial; abE= epiderme abaxial; Ct= Cutícula.



Fonte: O autor

É possível observar na face abaxial a presença de estômatos no mesmo nível e também acima do nível das demais células epidérmicas (Fig. 5).

**Figura 5.** Microfotografias da epiderme abaxial de folhas adultas de *Vitis labrusca* evidenciando a distribuição dos estômatos. A-B: Folhas coletadas no sistema Y sem cobertura plástica (YT). C-D: Folhas coletadas no sistema Y sob cobertura plástica (YT-PC). St= Estômato.



Fonte: O autor

Nas safras primavera-verão 2019/2020, não foram observadas diferenças estatísticas na densidade de estômatos e índice estomático entre as folhas do sistema YT e YT-PC ( $P > 0,05$ ) (Tabela 3). A espessura do mesofilo e da lâmina foliar foi maior nas folhas que se encontravam ao céu aberto (YT) (Fig. 4A). Nas duas safras, houve redução de até pelo menos 1,3 vezes da espessura do limbo foliar e do mesofilo das plantas em YT-PC (Tabela 3). Tanto os valores de espessura das células epidérmicas (abaxial e adaxial) quanto a espessura da parede periclinal externa (abaxial e adaxial) foram significativamente maiores no sistema YT (Tabela 3). Essas diferenças também foram observadas na espessura dos parênquimas paliçádico e lacunoso entre os sistemas de condução (Fig. 4 A-B). Nas duas safras, maiores espessuras das células parenquimáticas foram obtidas a partir de folhas coletadas no sistema YT. A espessura da cutícula em ambas as faces adaxial e abaxial mostraram diferenças significativas entre os sistemas de condução nas safras primavera-verão 2018/2019 e 2019/2020 ( $P > 0,05$ ). As espessuras da cutícula abaxial do YT e YT-PC foram de 1,52 µm e 1,16 µm, respectivamente, na safra 2018/2019 e de 1,54 µm e 1,26 µm, respectivamente, na safra 2019/2020, respectivamente (Tabela 3).

### 2.3.3 Dados meteorológicos

Na safra outono-inverno de 2018, os valores médios de  $T_{med}$  e UR foram, respectivamente, de 21°C e 72% e a precipitação acumulada foi de 333 mm, distribuída em um total de 26 dias (Tabela 4, Fig. 6). Os valores médios de DPM nos sistemas VSP, YT e YT-PC foram de 9,5 h dia<sup>-1</sup>, 11,1 h dia<sup>-1</sup> e 2,3 h.dia<sup>-1</sup>, respectivamente (Tabela 4). Durante as safras primavera-verão (2018/2019 e 2019/2020), os valores médios de  $T_{med}$  e UR foram, respectivamente, 24°C e 74%. A DPM média foi maior que 7,0 h dia<sup>-1</sup> nos sistemas VSP e YT e menor que 1,5 h dia<sup>-1</sup> no sistema em YT-PC (Tabela 4, Fig. 6). Nas safras primavera-verão 2018/2019 e 2019/2020. o número de dias com chuva (> 1mm) foram de 80 e 89 dias, respectivamente, e a precipitação total acumulada foi maior que 800 mm.

A temperatura foliar ( $T_{folha}$ ) apresentou grande variabilidade entre os horários de 7:00, 10:00 e 14:00 nos sistemas YT e YT-PC. Nos horários das 18:00 e 21:00, foi possível notar a redução da variabilidade da  $T_{folha}$  nos dois sistemas avaliados (Fig. 7). No horário entre 10:00 e 14:00 horas, não houve diferença da  $T_{folha}$  entre os sistemas, no entanto, a partir das 18:00 horas, o sistema YT-PC apresentou maior  $T_{folha}$  em relação ao YT ( $P < 0,05$ ).

**Tabela 3** - Medidas dos caracteres foliares (média e desvio padrão) em folhas de ‘Niagara Rosada’ coletadas em diferentes sistemas de condução nas safras 2018/2019 e 2019/2020.

Caracteres <sup>a</sup>	Safrá 2018/2019		Safrá 2019/2020	
	YT	YT-PC	YT	YT-PC
Espessura total do limbo ( $\mu\text{m}$ )	208,61 ( $\pm$ 28,58) a	154,31 ( $\pm$ 16,12) b	227,58 ( $\pm$ 24,22) a	176,39 ( $\pm$ 24,71) b
Espessura do mesófilo ( $\mu\text{m}$ )	170,20 ( $\pm$ 28,02) a	121,33 ( $\pm$ 15,34) b	195,78 ( $\pm$ 24,41) a	141,85 ( $\pm$ 22,30) b
Espessura do parênquima paliçádico ( $\mu\text{m}$ )	96,64 ( $\pm$ 16,48) a	65,58 ( $\pm$ 9,67) b	100,18 ( $\pm$ 10,69) a	77,98 ( $\pm$ 15,79) b
Espessura do parênquima lacunoso ( $\mu\text{m}$ )	73,46 ( $\pm$ 16,07) a	55,65 ( $\pm$ 8,10) b	95,60 ( $\pm$ 19,37) a	63,87 ( $\pm$ 10,69) b
Espessura da epiderme adaxial ( $\mu\text{m}$ )	17,72 ( $\pm$ 2,28) a	15,56 ( $\pm$ 1,45) b	19,14 ( $\pm$ 2,72) a	16,22 ( $\pm$ 2,09) b
Espessura da epiderme abaxial ( $\mu\text{m}$ )	20,68 ( $\pm$ 1,71) a	17,42 ( $\pm$ 2,07) b	20,77 ( $\pm$ 2,79) a	18,32 ( $\pm$ 2,51) b
Espessura da parede periclinal externa adaxial ( $\mu\text{m}$ )	3,00 ( $\pm$ 0,47) a	2,24 ( $\pm$ 0,63) b	3,65 ( $\pm$ 0,63) a	3,00 ( $\pm$ 0,48) b
Espessura da parede periclinal externa abaxial ( $\mu\text{m}$ )	2,36 ( $\pm$ 0,36) a	1,48 ( $\pm$ 0,27) b	3,17 ( $\pm$ 1,14) a	2,62 ( $\pm$ 0,37) b
Espessura da cutícula adaxial ( $\mu\text{m}$ )	1,92 ( $\pm$ 0,17) a	1,60 ( $\pm$ 0,22) b	2,10 ( $\pm$ 0,41) a	1,89 ( $\pm$ 0,43) b
Espessura da cutícula abaxial ( $\mu\text{m}$ )	1,52 ( $\pm$ 0,18) a	1,16 ( $\pm$ 0,15) b	1,54 ( $\pm$ 0,30) a	1,26 ( $\pm$ 0,29) b
Densidade estomática (estômatos/ $\text{mm}^2$ )	nd <sup>b</sup>	nd	51,88 ( $\pm$ 8,82) a	45,63 ( $\pm$ 11,26) a
Índice estomático	nd	nd	8,51 ( $\pm$ 1,59) a	7,86 ( $\pm$ 1,56) a

<sup>a</sup>Médias seguidas da mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste-*t* ( $p < 0,05$ ).

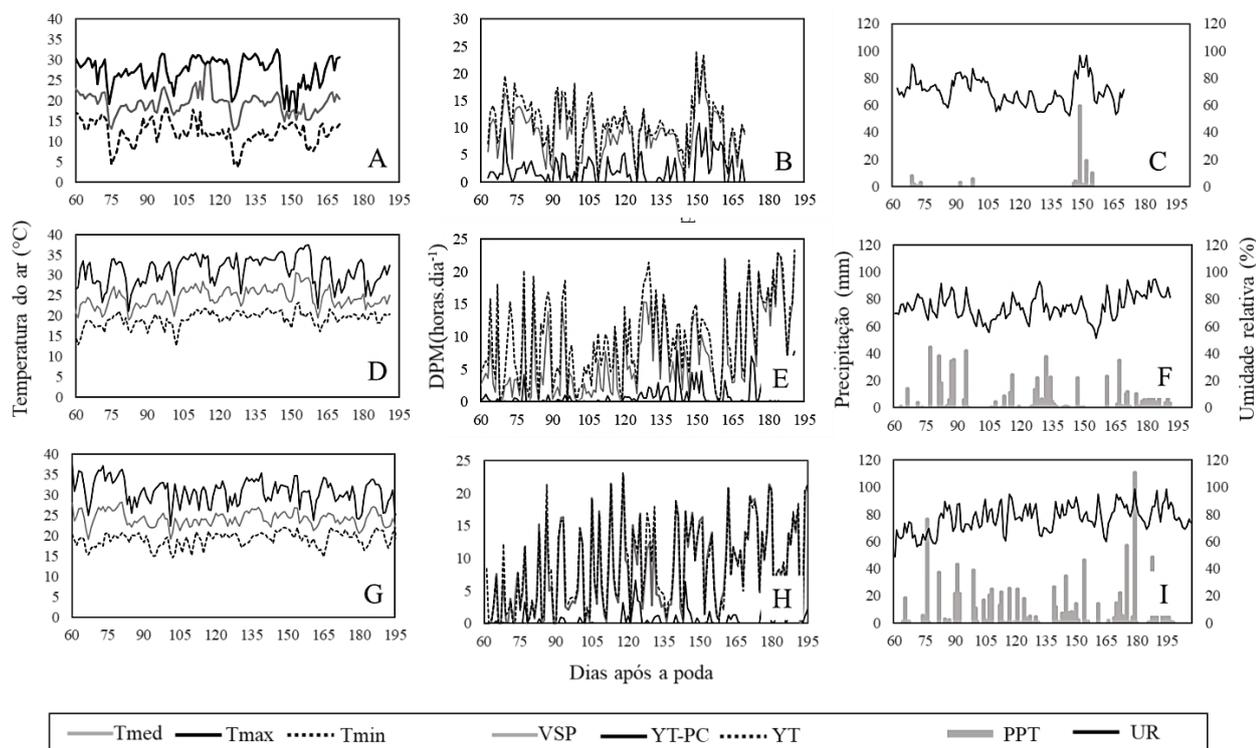
<sup>b</sup>nd=não determinado.

**Tabela 4** - Valores médios das temperaturas máxima (Tmax), mínima (Tmin) e média (Tmean), umidade relativa (UR), precipitação (PPT) e duração do período de molhamento foliar (DPM) obtidos em diferentes épocas da videira ‘Niagara Rosada’ em Piracicaba, Estado de São Paulo, Brasil.

Variáveis meteorológicas	outono-inverno 2018	primavera-verão 2018/2019	primavera-verão 2019/2020
Tmed (° C)	20,80 ± 0,24 b	23,74 ± 0,19 a	23,56 ± 0,18 a
Tmin (° C)	14,15 ± 0,29 b	18,30 ± 0,19 a	17,79 ± 0,19 a
Tmax (° C)	28,41 ± 0,26 b	30,49 ± 0,27 a	30,62 ± 0,24 a
RH (%)	71,66 ± 0,69 b	74,31 ± 0,71 a	73,87 ± 0,83 a
PPT (mm)	333,00 -	859,59 -	1116,82 -
DPM VSP	9,53 ± 0,34 a	7,89 ± 0,43 b	7,39 ± 0,44 b
DPM YT	11,06 ± 0,33 a	9,84 ± 0,44 b	7,99 ± 0,43 c
DPM YT-PC	2,25 ± 0,18 a	1,22 ± 0,14 b	0,75 ± 0,10 c

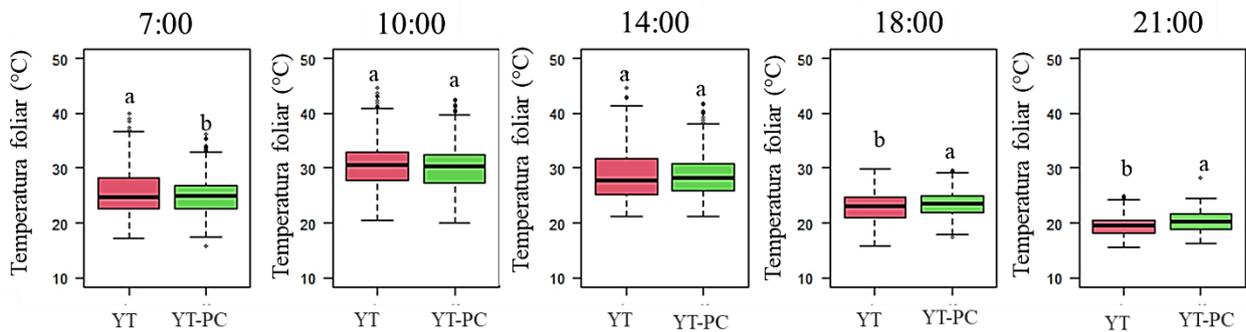
As médias seguidas da mesma letra nas linhas não são significativamente diferentes com base no teste de Scott-Knot ( $P \leq 0,05$ ).

**Figura 6.** Variáveis meteorológicas temperatura (°C), duração do período de molhamento foliar (h/dia), umidade relativa do ar (%) e volume de chuva (mm) durante a safra outono-inverno de 2018 (A-C), primavera-verão 2018/2019 (D-F) e primavera-verão 2019/2020 (G-I).



Fonte: O autor

**Figura 7.** Temperatura foliar (°C), obtida em diferentes horários, de plantas de videira conduzidas nos sistemas Y descoberto (YT) e Y associado a cobertura plástica (YT-PC). Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste-*t* ( $p < 0,05$ ).

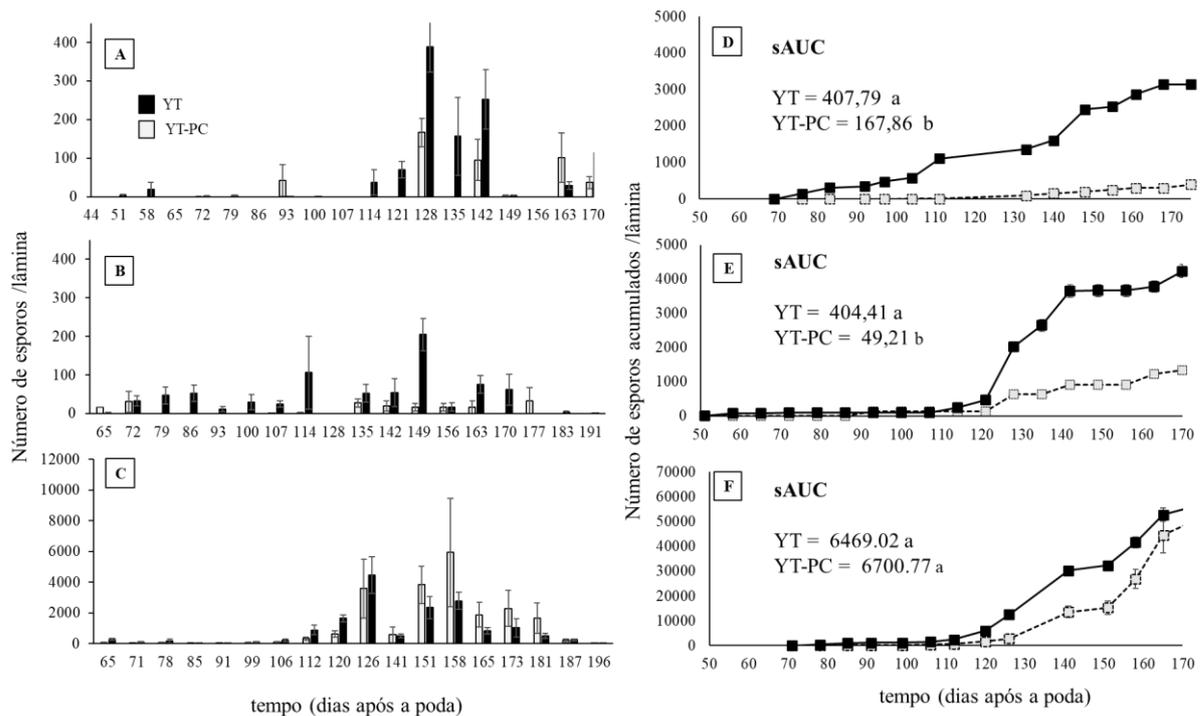


Fonte: O autor

### 2.3.4 Dinâmica dos urediniósporos de *Neophytopella tropicalis*

Na safra outono-inverno de 2018, os esporos começaram a ser coletados nas armadilhas aos 51 DAP e 93 DAP no YT e YT-PC, respectivamente. Os maiores números de esporos coletados por lâmina foram encontrados no 128 DAP, independentemente do sistema de condução (Fig. 8A). Na safra primavera-verão 2018/2019, os esporos começaram a ser observados aos 72 DAP no YT e aos 65 DAP no YT-PC (Fig. 8B).

**Figura 8.** Número médio (A-C) e acumulado (D-F) de esporos de *Neophytopella tropicalis* coletados nas lâminas entre os sistemas de condução de 'Niagara Rosada' durante a safra de outono-inverno 2018 (A e D), primavera-verão 2018-2019 (B e E) e primavera-verão 2019/2020 (C e F).



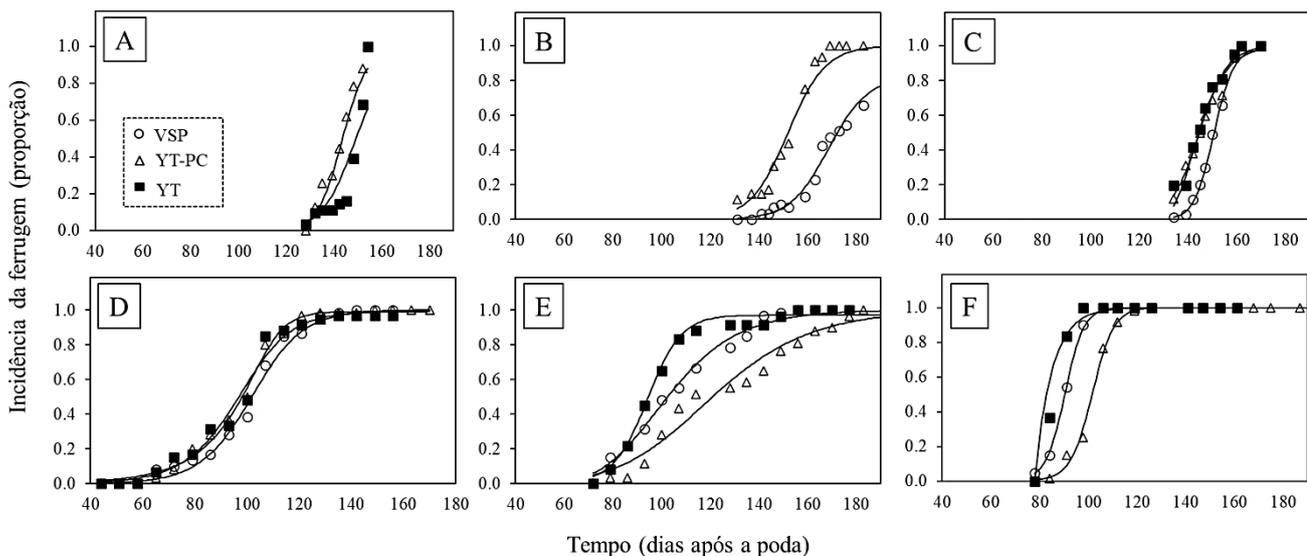
Fonte: O autor

A área abaixo da curva do número de esporos acumulados por lâmina (sAUC) foi maior no sistema YT durante a safra outono-inverno 2018 e primavera-verão 2018/2019 (Fig. 8D-F). Contudo, na safra primavera-verão 2019/2020, não houve diferença nos valores de sAUC ( $P > 0,05$ ) entre os sistemas de condução e o número de esporos coletados nessa safra foi significativamente superior em relação as safras anteriores (Fig. 8C e F). Nessa safra, as plantas do YT-PC permaneceram enfolhadas por muito mais tempo que nos outros sistemas de condução, mas a coleta de esporos foi comparada apenas até o dia 170 após a poda, para padronização.

### 2.3.5 Progresso temporal das epidemias de ferrugem

As curvas de progresso da incidência ajustadas ao modelo de Richards estão apresentadas na Fig. 9. O ajuste do modelo de Richards aos dados forneceu uma descrição aceitável de todas as epidemias, com  $R^2$  maior que 0,92 e Erro Quadrático Médio (MSE) menor que 0,035 (Tabela 5). Na maioria das curvas, o valor assintótico estimado da incidência da doença (parâmetro  $K$ ) atingiu 1,0, ou seja, 100% de incidência da doença.

**Figura 9.** Curvas de progresso da incidência da ferrugem da videira (*Neophytopella tropicalis*) em diferentes sistemas de condução e ajuste do modelo de Richards (linhas completas). Progresso da ferrugem durante as safras: (A) primavera-verão 2014/2015, (B) primavera-verão 2015/2016, (C) primavera-verão 2016/2017, (D) outono-inverno 2018, (E) primavera-verão 2018/2019 e (F) primavera-verão 2019/2020. Os dados das safras primavera-verão 2014/2015, primavera-verão 2015/2016 e primavera-verão 2016/2017 foram coletados por Camargo (2017).



Fonte: O autor

Os valores do parâmetro de forma ( $m$ ) obtidos na função de Richards variaram de  $0 < m < 2$  (assimetria à direita) em sete curvas do progresso da incidência da doença, enquanto seis curvas apresentaram valores de  $m$  superiores a 2 (assimetria à esquerda), e duas curvas apresentaram  $m$  igual a 2 (forma sigmoide simétrica). A curva de progresso da ferrugem no sistema YT durante a safra de 2019/2020 foi o único caso em que  $m$  foi igual a 0, assemelhando-se ao modelo monomolecular, não possuindo ponto de inflexão (Tabela 5 e Fig. 9).

A incidência final da doença não foi influenciada pelos sistemas de condução nem pelas diferentes safras. Na maioria dos casos, a incidência atingiu 100%, exceto no sistema VSP durante a primavera-verão 2015/2016 (82,4%) (Fig. 9B) e no YT durante o outono-inverno 2018 (97,1%) (Fig. 9F).

**Tabela 5** - Ajuste não-linear da função de Richards às curvas de incidência de ferrugem da videira (*Neophytopella tropicalis*) ao longo do tempo em diferentes safras e sistema de condução de ‘Niagara Rosada’.

Safras	Sistemas de condução	Fonte de inóculo <sup>a</sup>	Parâmetros da curva <sup>b</sup>				Estatística <sup>c</sup>	
			<i>K</i>	<i>B</i>	<i>r</i>	<i>m</i>	MSE	<i>R</i> <sup>2</sup>
Primavera-verão 2014/2015	VSP	NI	1,00	2,17E+08	0,13	1,80	0,032	0,937
	YT	NI	1,00	1,01E+11	0,18	1,80	0,004	0,970
	YT-PC <sup>d</sup>	-	-	-	-	-	-	-
Primavera-verão 2015/2016	VSP	NI	0,82	8,70E+08	0,12	1,93	0,002	0,997
	YT <sup>e</sup>	-	-	-	-	-	-	-
	YT-PC	NI	1,00	4,21E+08	0,13	2,00	0,004	0,998
Primavera-verão 2016/2017	VSP	NI	1,00	7,73E+14	0,23	1,80	0,002	0,999
	YT	NI	1,00	7,13E+10	0,17	2,00	0,022	0,987
	YT-PC	NI	1,00	4,00E+07	0,14	1,14	0,004	0,998
Outono-inverno 2018	VSP	NI+AI	1,00	4,63E+04	0,10	2,10	0,001	0,999
	YT	NI+AI	0,99	4,87E+04	0,11	2,32	0,003	0,999
	YT-PC	NI+AI	0,99	4,57E+08	0,19	3,90	0,001	0,999
Primavera-verão 2018/2019	VSP	NI+AI	1,00	6,80E+01	0,06	1,28	0,001	0,999
	YT	NI+AI	0,97	1,32E+06	0,15	2,10	0,001	0,999
	YT-PC	NI+AI	1,00	7,33E+01	0,04	1,49	0,005	0,998
Primavera-verão 2019/2020	VSP	NI+AI	1,00	3,24E+10	0,27	2,10	0,000	0,999
	YT	NI+AI	1,00	6,50E+04	0,14	0,00	0,005	0,992
	YT-PC	NI+AI	1,00	2,29E+10	0,23	2,10	0,001	0,999

<sup>a</sup> NI = fonte natural de inóculo; AI = fonte de inóculo artificial.

<sup>b</sup> parâmetros obtidos a partir das curvas de progresso de incidência da ferrugem ajustadas ao modelo de Richards, utilizando análise de regressão não linear. *K* = parâmetro assíntota (proporção), *B* = constante de integração, *r* = parâmetro de taxa (dia<sup>-1</sup>), *m* = parâmetro de forma.

<sup>c</sup> *R*<sup>2</sup> = Coeficiente de determinação; MSE = erro quadrado médio final.

<sup>d</sup> Os parâmetros de progresso da doença não foram calculados no YT-PC durante a safra de 2014/2015 porque este sistema foi instalado em campo na safra 2015/2016.

<sup>e</sup> A avaliação da doença no YT na safra 2015/2016 não pode ser calculada como consequência da interferência direta da severidade do míldio nas folhas.

### 2.3.6 Elementos de curva

Os valores de *rho* variaram de 0,009 a 0,071 e, independentemente do sistema de condução, os menores valores foram obtidos no outono-inverno de 2018 e primavera-verão de 2018/2019 (Tabela 6). Os sintomas começaram a se desenvolver 65 a 134 dias após a poda, dependendo da safra, sistema de condução e fonte de inóculo. O tempo de início da doença (*t*<sub>0,05</sub>) e o tempo para atingir o ponto de inflexão (*t*<sub>ip</sub>) foram atrasados em epidemias impulsionadas no campo apenas por inóculo natural (NI). Em condições de NI, os valores de *t*<sub>0,05</sub> variaram de 128 a 134 DAP, enquanto valores inferiores a 100 DAP foram observados em epidemias com influência da fonte artificial de inóculo (NI + AI) (Tabela 6).

### 2.3.7 Análise de correlação de Pearson

Correlações positivas significativas ( $P < 0,05$ ) ( $r > 0,80$ ) foram encontradas entre  $\rho$  e os parâmetros relacionados à severidade da doença, ou seja, DSF e sAUDPC. Os valores de iAUDPC também foram correlacionados com DSF,  $\rho$  e sAUDPC ( $r \geq 0,58$ ). No entanto,  $\rho$  correlacionou-se negativamente com  $DI_{tip}$  e  $AUC_{leaves}$  ( $r \geq 0,53$ ). O parâmetro de forma  $m$  foi significativamente correlacionado apenas com  $DI_{tip}$  ( $r > 0,87$ ), e uma correlação significativa foi encontrada entre os parâmetros  $t_{ip}$  e  $t_{0,05}$  ( $r = 0,90$ ) os quais não foram correlacionados ( $P \geq 0,05$ ) com nenhum dos demais parâmetros (Tabela 7).

**Tabela 6** - Variáveis epidemiológicas utilizadas para caracterizar epidemias de ferrugem causada por *Neophytophthora tropicalis* em plantas ‘Niagara Rosada’, em diferentes safras e sistema de condução.

Safras	Sistemas de condução	Fonte de inóculo <sup>a</sup>	Parâmetros estimados <sup>a</sup>			Variáveis relacionadas à doença <sup>a</sup>				
			<i>rho</i>	DI <sub>tip</sub>	t <sub>ip</sub>	t <sub>0,05</sub>	iAUDPC	sAUDPC	DFS	AUC <sub>leaves</sub>
Primavera-verão 2014/2015	VSP	NI	0,023	0,48	149	128	0,279	0,012	0,046	0,871
	YT	NI	0,034	0,516	143	132	0,465	0,007	0,022	0,784
	YT-PC	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Primavera-verão 2015/2016	VSP <sup>d</sup>	NI	0,017	0,406	168	-	0,309	-	-	0,796
	YT	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	YT-PC	NI	0,022	0,5	152	124	0,654	0,009	0,024	0,812
Primavera-verão 2016/2017	VSP	NI	0,041	0,48	150	134	0,542	0,014	0,042	0,771
	YT	NI	0,029	0,5	145	129	0,685	0,019	0,035	0,756
	YT-PC	NI	0,032	0,392	142	129	0,663	0,03	0,056	0,772
Autumn–winter 2018	VSP	NI+AI	0,017	0,509	102	65	0,499	0,003	0,005	0,833
	YT	NI+AI	0,016	0,523	98	65	0,529	0,003	0,005	0,829
	YT-PC	NI+AI	0,019	0,62	102	65	0,532	0,008	0,021	0,924
Primavera-verão 2018/2019	VSP	NI+AI	0,012	0,414	98	79	0,668	0,004	0,015	0,894
	YT	NI+AI	0,023	0,494	94	79	0,733	0,006	0,013	0,799
	YT-PC	NI+AI	0,009	0,443	116	93	0,528	0,002	0,004	0,948
Primavera-verão 2019/2020	VSP	NI+AI	0,043	0,509	91	84	0,824	0,056	0,108	0,757
	YT	NI+AI	0,071	ni <sup>d</sup>	ni	84	0,867	0,070	0,111	0,754
	YT-PC	NI+AI	0,038	0,509	102	91	0,702	0,004	0,059	0,969

<sup>a</sup> NI = fonte natural de inóculo; AI = fonte de inóculo artificial. DI<sub>tip</sub> = incidência da doença no ponto de inflexão (proporção), t<sub>ip</sub> = tempo necessário para atingir o ponto de inflexão (dias), *rho* = taxa absoluta média ponderada de aumento da doença (proporção dia<sup>-1</sup>); t<sub>0,05</sub> = tempo em dias para atingir DI = 0,05 (dias); s<sub>e</sub>AUDPS = área sob curva de evolução da severidade da doença; i<sub>e</sub>AUDPS = área sob curva de progresso da incidência; DFS = severidade da doença na data final da avaliação (proporção); AUC<sub>leaves</sub> = área sob a curva de progresso das folhas remanescentes.

<sup>d</sup> Os parâmetros de progresso da doença não podem ser calculados devido a valores de severidade muito baixos.

<sup>e</sup> Sem ponto de inflexão.

**Tabela 7** - Coeficientes de correlação para nove elementos de curva utilizados para caracterizar epidemias de ferrugem da videira, causada por *Neophytophella tropicalis*.

Elementos de curva <sup>a</sup>	<i>m</i>	<i>rho</i>	DI <sub>(tip)</sub>	<i>t</i> <sub>ip</sub>	<i>t</i> <sub>0,05</sub>	iAUDPS	sAUDPC	DFS	AUC <sub>leaves</sub>
<i>m</i>	1,00	-0,51	<b>0,87<sup>b</sup></b>	0,00	-0,26	-0,35	-0,47	-0,43	-0,36
<i>rho</i>	...	1,00	<b>-0,68</b>	-0,60	0,20	<b>0,54</b>	<b>0,88</b>	<b>0,87</b>	<b>-0,53</b>
DI <sub>(tip)</sub>	...	...	1,00	0,30	0,00	-0,48	<b>-0,64</b>	<b>-0,57</b>	0,32
<i>t</i> <sub>ip</sub>	...	...	...	1,00	<b>0,90</b>	-0,51	-0,36	-0,22	-0,20
<i>t</i> <sub>0,05</sub>	...	...	...	...	1,00	-0,24	0,00	0,12	-0,37
iAUDPS	...	...	...	...	...	1,00	<b>0,69</b>	<b>0,58</b>	-0,34
sAUDPC	...	...	...	...	...	...	1,00	<b>0,97</b>	-0,34
DFS	...	...	...	...	...	...	...	1,00	-0,40
AUC <sub>leaves</sub>	...	...	...	...	...	...	...	...	1,00

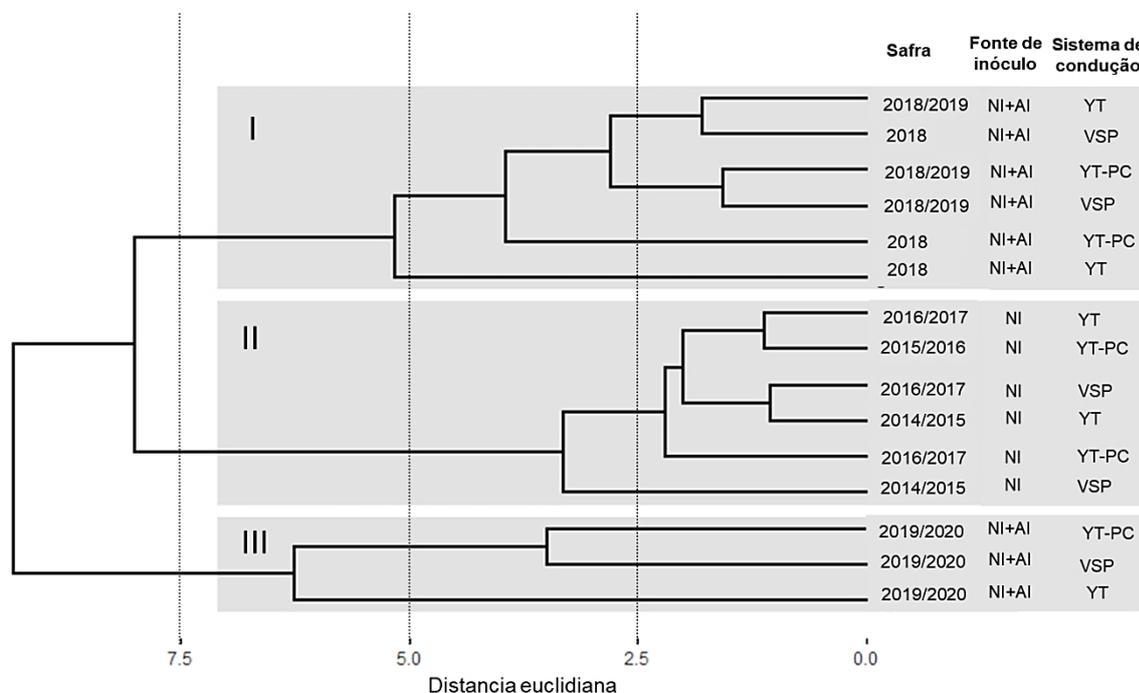
<sup>a</sup> *m* = parâmetro de forma; *rho* = taxa absoluta média ponderada de aumento da doença (proporção dia<sup>-1</sup>); DI<sub>tip</sub> = incidência da doença no ponto de inflexão (proporção), *t*<sub>ip</sub> = tempo necessário para atingir o ponto de inflexão (dias), *t*<sub>0,05</sub> = tempo em dias para atingir DI = 0,05 (dias); iAUDPS = área sob curva de progresso da incidência; sAUDPS = área sob curva de evolução da severidade da doença; DFS = severidade da doença na data final da avaliação (proporção); AUC<sub>leaves</sub> = área sob a curva de progresso das folhas remanescentes.

<sup>b</sup> Os coeficientes de correlação significativos ( $P < 0,05$ ) obtidos pelo teste de correlação de Pearson estão representados em negrito.

### 2.3.8 Análise de Cluster

O dendrograma de agrupamento mostrou que as epidemias de ferrugem foram distribuídas em três grupos funcionais (nomeados I, II e III), com medidas semelhantes dos parâmetros da doença, conectadas a um limiar de 7,0 unidades de distância euclidiana (Fig. 10). O grupo I compreendeu seis epidemias que ocorreram nas safras outono-inverno de 2018 e primavera-verão de 2018/2019, independentemente do sistema de condução (Fig. 10). As epidemias incluídas neste grupo foram caracterizadas pelos menores valores de sAUDPC, *rho* e DSF (Tabela 8, Apêndice A). O grupo II separou seis epidemias que ocorreram a partir de fonte natural de inóculo e se desenvolveram em campo no período de 2014/2015 a 2016/2017, tendo sido caracterizadas pelos maiores valores de *t*<sub>0,05</sub> e *t*<sub>ip</sub>. O grupo III compreendeu as três epidemias restantes que se desenvolveram nos três sistemas de condução na safra primavera-verão 2019/2020, com base nos maiores valores de sAUDPC, *rho*, DSF e iAUDPC (Tabela 8, Apêndice A). Por conta da forma monomolecular, a epidemia ocorrida durante a safra 2019/2020 no sistema YT teve o menor valor de *m* e DI<sub>tip</sub> (ambos iguais a 0), e por esse motivo, esse tratamento foi separado dos demais, utilizando um limiar de <5,0 unidades de distância euclidiana (Fig. 10).

**Figura 10.** Dendrograma representando semelhanças relativas entre 15 epidemias de ferrugem, causadas por *Neophytopella tropicalis*, em ‘Niagara Rosada’. O experimento foi conduzido durante a safra 2014/2015 a 2019/2020, em três diferentes sistemas de condução: Espaldeira (VSP), Sistema Y descoberto (YT) e Y associado a cobertura plástica (YT-PC). As epidemias foram impulsionadas por fonte de inóculo natural (NI) ou inóculo artificial combinado com o natural (NI+AI).



Fonte: O autor

**Tabela 8** - Médias dos grupos (clusters) das nove variáveis que caracterizaram as epidemias de ferrugem da videira, causada por *Neophytopella tropicalis*.

Parâmetros <sup>a</sup>	Clusters <sup>b</sup>		
	I	II	III
<i>m</i>	2,198 a	1,757 a	1,400 a
<i>rho</i>	0,016 c	0,030 b	0,050 a
DI <sub>tip</sub>	0,500 a	0,478 a	0,340 a
tip	102 b	147 a	90 b
DI <sub>final</sub>	0,995 a	1,000 a	1,000 a
t <sub>0,05</sub>	74 b	129 a	86 b
i_AUDPC	0,581 b	0,548 b	0,798 a
s_AUDPC	0,004 c	0,015 b	0,055 a
DFS	0,010 c	0,037 b	0,093 a
AUC <sub>leaves</sub>	0,871 a	0,794 a	0,826 a

<sup>a</sup> *m* = parâmetro de forma; *rho* = taxa absoluta de aumento da doença; DI<sub>tip</sub> = incidência da doença no ponto de inflexão; tip = tempo em dias para atingir o ponto de inflexão; DI<sub>final</sub> = incidência da doença na data final da avaliação; t<sub>0,05</sub> = tempo em dias para opara atingir DI = 0,05; i\_AUDPC = área padronizada sob curva de progresso da incidência; s\_AUDPC = área padronizada sob curva de progresso da severidade; DSF = severidade final da doença; e AUC<sub>leaves</sub> = área padronizada sob a curva de progresso das folhas remanescentes.

<sup>b</sup> Médias seguidas pela mesma letra nas linhas não diferem entre si com base no teste não paramétrico de Kruskal-Wallis ( $P \leq 0,05$ ).

### 2.3.9 Análise de componentes principais (PCA)

Na análise de PCA, os dois primeiros componentes principais explicaram 75,5% da variância total dos dados das 15 epidemias em nosso estudo (Tabela 9). A variação atribuível aos restantes PCs foi marginal; portanto, apenas os PCs 1 e 2 foram extraídos dos dados do progresso da doença. Como resultado, a dimensionalidade dos nove parâmetros da doença foi efetivamente reduzida a duas variáveis descritivas que constituíram uma combinação dos parâmetros da doença (Tabela 9).

**Tabela 9** - Autovetores (correlações) e autovalores dos Componentes Principais (PC) derivados de nove elementos de curva, usados para caracterizar epidemias de ferrugem, causada por *Neophytopella tropicalis*, em ‘Niagara Rosada’.

Parâmetros <sup>a</sup>	Correlação das variáveis		Contribuição das variáveis (%)	
	PC 1	PC 2	PC 1	PC 2
<i>rho</i>	<b>0,91<sup>c</sup></b>	0,15	18,15	1,03
<i>m</i>	<b>-0,69</b>	-0,26	10,51	2,92
DI <sub>(tip)</sub>	<b>-0,82</b>	0,00	14,84	0,00
t <sub>ip</sub>	-0,33	<b>0,92</b>	2,38	38,30
t <sub>0,05</sub>	0,05	<b>0,97</b>	0,06	42,17
iAUDPS	<b>0,73</b>	-0,34	11,77	5,21
sAUDPC	<b>0,93</b>	-0,10	18,92	0,42
DFS	<b>0,89</b>	0,04	17,36	0,08
AUC <sub>leaves</sub>	<b>-0,52</b>	-0,47	5,99	9,86
Autovalores	4,57	2,23	-	-
Percentual da variância (%)	50,72	24,78	-	-
Variância cumulativa (%)	50,72	75,50	-	-

<sup>a</sup> *m* = parâmetro de forma; *rho* = taxa absoluta de aumento da doença; DI<sub>tip</sub> = incidência da doença no ponto de inflexão; t<sub>ip</sub> = tempo em dias para atingir o ponto de inflexão; DI<sub>final</sub> = incidência da doença na data final da avaliação; t<sub>0,05</sub> = tempo em dias para o para atingir DI = 0,05; i<sub>-</sub>AUDPC = área padronizada sob curva de progresso da incidência; s<sub>-</sub>AUDPC = área padronizada sob curva de progresso da severidade; DFS = severidade final da doença; e AUC<sub>leaves</sub> = área padronizada sob a curva de progresso das folhas remanescentes.

<sup>b</sup> Números em negrito indicam elementos de curva que dominam (> 0,5) os componentes principais PC e, PC2.

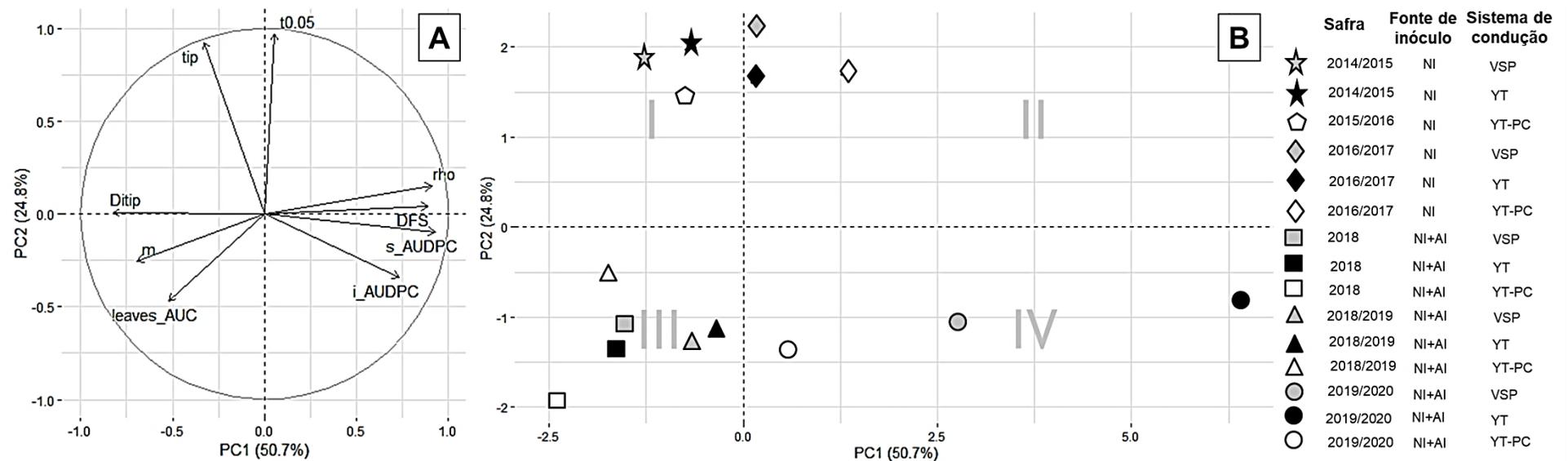
O primeiro PC, responsável por 50,7% da variação total, foi dominado por altos pesos positivos ( $\geq 0,73$ ) para *rho*, sAUDPC, iAUDPC e DFS, e altos pesos negativos ( $\leq -0,52$ ) para *m*, DI<sub>tip</sub> e AUC<sub>leaves</sub>. As maiores contribuições (>17%) para este PC1 foram das variáveis sAUDPC, *rho* e DFS. O segundo PC explicou 24,8% da variância total e foi dominado por altos pesos positivos ( $\geq 0,92$ ) para t<sub>ip</sub> e t<sub>0,05</sub>, que foram as principais variáveis contribuintes para esse PC (Tabela 4). Esses resultados demonstraram que o PC1 foi associado principalmente aos

padrões de curva e à quantidade de doença, enquanto o PC2 pode ser interpretado como um componente posicional para o desenvolvimento da epidemia ao longo do tempo.

Altas correlações entre diversas variáveis também foram detectadas no *biplot* entre PC1 *versus* PC2 (Fig. 11). Neste *biplot*,  $\rho$ , DSF, sAUDPC e iAUDPC foram correlacionados positivamente entre si e negativamente correlacionados com  $DI_{tip}$ ,  $m$  e  $AUC_{leaves}$ , como mostrado no ângulo do vetor (aproximadamente  $180^\circ$ ) (Fig. 11A).

De acordo com a posição das epidemias projetadas ao longo do eixo x, a intensidade da doença aumentou da esquerda para a direita. Da mesma forma, a posição das epidemias projetadas ao longo do eixo y indicou que o desenvolvimento da epidemia foi atrasado de baixo para cima ao longo do eixo. Assim, as epidemias com menor intensidade de doença e início mais tardio foram agrupadas no quadrante I, que incluiu as epidemias desenvolvidas a partir da fonte NI em 2014/2015 para VSP e YT e em 2015/2016 para o sistema YT-PC. As epidemias, com maior intensidade de doença e com início mais precoce, foram localizadas no quadrante IV, que incluiu aquelas desenvolvidas na safra 2019/2020 para qualquer um dos sistemas de condução e desenvolvidas a partir da combinação NI + IA (Fig. 11B).

**Figura 11.** Análise de Componentes Principais de nove elementos de curva de doença relacionados a 15 epidemias de ferrugem da videira (*Neophytopella tropicalis*) em plantas de ‘Niagara Rosada’. As parcelas do experimento foram conduzidas durante as safras 2014/2015 a 2019/2020 em três diferentes sistemas de condução: Espaldeira (VSP), Y descoberto (YT) e Y associado a cobertura plástica (YT-PC). As epidemias foram impulsionadas por fonte de inóculo natural (NI) ou pela combinação de inóculo artificial e natural (NI+AI). **(A)** Biplots de correlação e importância relativa das variáveis. Vetores mais longos paralelos a um eixo representam variáveis que são melhor representadas pelos dois fatores. **(B)** De acordo com a posição das epidemias projetadas ao longo do eixo x, a intensidade geral da doença aumenta da esquerda (I e III) para a direita (II e IV). Da mesma forma, a posição projetada ao longo do eixo y indica que o desenvolvimento da epidemia é atrasado de baixo (III e IV) para cima (I e II) ao longo do eixo y. I- Epidemias com menor intensidade de doença e com início mais tardio. II- Epidemias com maior intensidade de doença e com início mais tardio. III- Epidemias com menor intensidade de doença e com início mais precoce. IV- Epidemias com maior intensidade de doença e com início mais precoce.



Fonte: O autor

## 2.4 Discussão

O sucesso das epidemias de doenças de plantas depende das condições climáticas, da pressão inicial do inóculo, da dinâmica da arquitetura do dossel e da suscetibilidade do hospedeiro à infecção entre os ciclos fenológicos. Os diferentes sistemas de condução e o uso da cobertura plástica adotados na viticultura podem promover alteração da arquitetura e fisiologia de plantas, além de influenciar o microclima e a intensidade de doenças. No entanto, esse trabalho demonstrou que o progresso temporal de *N. tropicalis* não foi influenciado pelos sistemas de condução, mas sim pelas diferenças na disponibilidade de inóculo e nas condições ambientais entre os diferentes anos de cultivo de 'Niagara Rosada'.

A estrutura das epidemias foi determinada pela realização de uma combinação de análises de cluster e de componentes principais. Essa abordagem resultou em uma epidemia caracterizada por nove elementos da curva de doença que foram reduzidos a dois componentes principais que podem ser interpretados epidemiologicamente. A descrição de elementos de curva, sugerida inicialmente por Kranz (1974), tem sido utilizada em diferentes estudos de epidemiologia comparativa testando os efeitos de diferentes tratamentos, como práticas culturais, aplicações de fungicidas, reações de cultivares ou virulência de diferentes estirpes ou raças de patógenos (por exemplo, CAMPBELL et al., 1980; GILLIGAN, 1990; HOLB et al., 2005; MORA-AGUILERA et al., 1996; NAVAS-CORTÉS et al., 1998; TWIZEYIMANA et al., 2011; VERNIÈRE et al., 2003).

Em nosso estudo, complementamos alguns elementos de curva fornecidos pela função de Richards, incluindo o parâmetro de taxa de crescimento absoluto médio ponderado ( $\rho$ ) e o formato da curva ( $m$ ). O bom ajuste fornecido pelo modelo de Richards aos nossos dados torna-o adequado para caracterização epidêmica de ferrugem em 'Niagara Rosada'. A forma do modelo, na maioria dos casos, foi assimétrica à direita. Nessas curvas, o aumento da taxa absoluta foi mais rápido à medida que a taxa se aproximava do ponto de inflexão. Em algumas curvas, o progresso de ferrugem teve uma fase exponencial prolongada com interrupção abrupta do aumento da incidência da doença (curva assimétrica à esquerda). Essa assimetria pode estar relacionada à heterogeneidade ao longo do tempo devido a modificações na suscetibilidade do tecido hospedeiro, densidade de inóculo ou variação nas condições ambientais que podem modificar as condições ótimas à infecção.

Normalmente, os sintomas de ferrugem se intensificam próximo ou até mesmo após a colheita e podem ser comumente vistos nas folhas mais velhas (ANGELOTTI et al., 2008; PRIMIANO et al., 2017). Nas safras em que foram adicionadas fontes de inóculo artificial no campo, os sintomas iniciais da ferrugem foram observados durante o estágio de

desenvolvimento dos frutos (entre 65 e 91 DAP). No entanto, em epidemias impulsionadas apenas por fonte natural de inóculo, os sintomas iniciais ocorreram somente após a colheita (> 120 DAP).

A estrutura das epidemias de ferrugem foi reduzida a dois PCs que representaram 75% da variância geral. O primeiro PC, responsável pela maior proporção de variância explicada, foi interpretado como a quantidade da doença (incluindo como *iAUDPS*, *sAUDPC* e *DFS*) e como uma descrição geral do progresso epidêmico (incluindo *m* e *rho*). O segundo PC obtido neste estudo teve um papel relativamente menor no processo epidêmico, mas foi interpretado por um componente posicional no tempo, incluindo  $t_{ip}$  e  $t_{0,05}$ . A análise de PCA tem sido usada para comparação de várias epidemias de doenças de plantas (por exemplo, CAMPBELL et al., 1980; HOLB et al., 2005; LANDA et al., 2004; MADDEN; PENNYPACKER et al., 1980; MORA-AGUILERA et al., 1996; NAVAS-CORTÉS et al., 1998). Ao determinar a estrutura das epidemias de murcha de *Fusarium* em grão-de-bico, Navas-Cortés et al. (1998), analisaram 108 epidemias, extraindo três fatores de cinco elementos da curva do índice de intensidade da doença (DII) ( $DII_{final}$ , *sAUDPC*,  $t_{0,05}$ ,  $t_{ip}$  e  $DII_{tip}$ ). Em contraste com nossos dados, o primeiro fator encontrado pelos autores foi explicado por  $t_{ip}$  e  $t_{0,05}$  enquanto o segundo fator foi explicado a partir de variáveis relacionadas à quantidade de doença ( $DII_{final}$  e *sAUDPC*).

As epidemias de ferrugem da videira foram claramente separadas em três grupos pela análise de cluster. As variáveis *sAUDPC*, *rho* e *DFS*, além da maior contribuição para sintetizar as 15 epidemias de ferrugem pela análise de PCA, tiveram uma forte influência na determinação do número e composição dos clusters. Por exemplo, a primavera-verão 2019/2020 foi a safra com maior severidade da doença e foi agrupada em um único cluster (Grupo III). Em contraste, o outono-inverno de 2018 e a primavera-verão de 2018/2019 foram agrupados em outro grupo caracterizado pelos níveis mais baixos de severidade da doença. Além disso, o Grupo II foi formado principalmente de acordo com os valores intermediários de *sAUDPC*, *rho* e *DFS* e os maiores valores de  $t_{ip}$  e  $t_{0,05}$ . As diferenças no tempo para o início da doença e o tempo para atingir o ponto de inflexão ao comparar as seis safras se devem à disponibilidade antecipada e/ou maior quantidade de inóculo a partir da introdução de plantas infectadas artificialmente nas parcelas experimentais em 2018.

Através dos resultados da PCA e do padrão de agrupamento das epidemias, é possível inferir que a fonte de inóculo e as safras tiveram maior influência no comportamento das epidemias de ferrugem do que os sistemas de condução e a cobertura plástica. Contudo, a cobertura plástica influenciou na dispersão aérea de *N. tropicalis*. A interceptação de esporos de *N. tropicalis* nas lâminas foi menor no sistema YT-PC nas safras outono-inverno 2018 e

primavera-verão-2019, safras nas quais o nível de inóculo na área e os valores de severidade da doença foram baixos. A cobertura plástica pode afetar a dispersão do inóculo uma vez que provoca redução da velocidade do vento em 88% a 90% no dossel das plantas (CHAVARRIA et al., 2007). Essa menor interceptação do inóculo de *N. tropicallis* também foi detectada por Batista et al. (2015) em plantas conduzidas em cobertura plástica em relação ao sistema descoberto. Entretanto, diferentemente das outras safras, não foi possível observar a redução na interceptação do inóculo de ferrugem no sistema YT-PC na safra primavera-verão 2019/2020. Durante essa safra, houve maior produção de inóculo, e possivelmente, a cobertura plástica atuou também como uma barreira física para reter os esporos produzidos nas copas de videira, contribuindo para o aumento da dispersão interna de esporos sob esse sistema.

Nesse estudo, a cobertura plástica também influenciou diretamente no ciclo fenológico das plantas, prolongando o final do ciclo das videiras e retardando a senescência das folhas. Cardoso et al. (2010), Chavarría et al. (2007), Comiran et al. (2012) e Hernandez et al. (2011) também verificaram que as folhas se mantiveram biologicamente ativas por um período superior nas plantas sob cobertura plástica e atribuíram esses resultados ao aumento da eficiência de interceptação da radiação solar pelo dossel vegetativo nesse sistema e, em partes, devido à redução da incidência de doenças fúngicas que poderiam interferir na fotossíntese das plantas. O período mais longo em que as folhas em YT-PC permaneceram aderidas às plantas permitiu a continuidade da formação de novos propágulos, contribuindo para que a doença atingisse altos níveis de incidência e severidade ao final do ciclo da videira. Em particular, a arquitetura da planta afeta a senescência, que muitas vezes é um fator importante para a receptividade do tecido à infecção. No entanto, a senescência acelerada pode aumentar ou reduzir o desenvolvimento epidêmico, dependendo do patossistema (TIVOLI et al., 2015). Por exemplo, a senescência mais rápida dos cultivos densos de ervilha resultou em maior severidade da queima de ascochyta causada por *Mycosphaerella pinodes* (RICHARD et al. 2012). Nesse caso, a prematura senescência das estípulas infectadas favoreceu a infecção de *M. pinodes* pela diminuição dos mecanismos de defesa, aumentando a receptividade das plantas para infecções secundárias (RICHARD et al. 2012).

De maneira geral, a severidade da doença teve um aumento mais acentuado logo após a colheita. No entanto, a média dos valores de severidade não tiveram sempre um aumento progressivo ao longo do tempo devido ao efeito da desfolha (Apêndice B). A maior severidade da ferrugem foi observada na safra primavera-verão 2019/2020 que coincidiu com a maior interceptação de esporos nas armadilhas. Contudo, na safra-outono-inverno de 2018, mesmo com menor interceptação de esporos e com DPM média menor que 3 horas, a severidade da

ferrugem foi maior sob a cobertura plástica, indicando que esses fatores não limitaram o progresso temporal da doença (Apêndice B). Para algumas ferrugens como *Puccinia polysora* em milho, períodos curtos de molhamento foliar (<4 h) foram suficientes para a ocorrência da infecção por uredinósporos desse patógeno (GODOY et al., 1999).

As características anatômicas das folhas sob o sistema YT-PC também podem ter contribuído para a maior severidade da ferrugem na safra-outono-inverno de 2018. A cobertura plástica pode provocar redução da radiação fotossinteticamente ativa (RFA) de 38% ao nível do dossel em relação à radiação no dossel vegetativo sob céu aberto (CHAVARRIA et al., 2009). Sob cobertura plástica, a folha de videira exibiu características típicas de folhas de sombra, com mesofilo, parênquimas paliçádico e lacunoso menos desenvolvidos que as folhas do YT a céu aberto, folhas ditas como “de sol”. Além disso, folhas sob YT-PC apresentaram menor espessura da cutícula e parede celular na face abaxial em relação ao sistema Y descoberto. Além dos estômatos, *N. tropicalis* pode penetrar diretamente através da cutícula na face abaxial da folha (PRIMIANO et al., 2017; RASERA) et al., 2019). Cutículas menos espessas podem facilitar a penetração dos patógenos e o processo de infecção (AGRIOS, 2005). Paredes menos espessas facilitam também o processo de colonização, tornando as plantas mais suscetíveis à ação dos patógenos (AGRIOS, 2005). Nas safras primavera-verão, as condições foram altamente favoráveis para infecção de *N. tropicalis*, e, mesmo com o maior espessamento da cutícula e da parede celular abaxial encontrado nas folhas do YT, a doença atingiu níveis mais altos de severidade nesse sistema.

Além da disponibilidade de inóculo ao longo dos ciclos produtivos da videira, a quantidade da doença e os padrões de progresso da doença variaram consideravelmente entre as safras, possivelmente devido a diferenças nas condições climáticas. Os experimentos de Batista et al. (2015) e Scapin-Buffara et al. (2018) confirmam que o comportamento epidemiológico da ferrugem pode variar de ano para ano ou de uma estação para outra. De fato, a severidade da ferrugem foi menor na safra de outono-inverno de 2018. Essa safra foi caracterizada por temperaturas mais baixas e precipitação menos frequente e irregular, em comparação com as safras de primavera-verão. Assim, a estação outono-inverno parece ser menos propícia ao desenvolvimento da ferrugem, mesmo com o inóculo disponível no campo. Embora mais estudos precisem ser realizados para confirmar essa hipótese, aparentemente, a produção de uvas no outono-inverno (safrinha) pode ser uma alternativa viável para os viticultores do Sudeste do Brasil evitarem os danos causados pela ferrugem. Com base nas diferenças de temperaturas, Scapin-Buffara et al. (2018) demonstraram que a ferrugem da videira em plantas de 'Niagara Rosada' cultivadas em VSP foi mais severa na safra verão-outono

do que na safra inverno-primavera no norte do Paraná. As severidades máximas da ferrugem variaram de 13,8 a 36,0% no verão comparadas com 0,2 a 3,3% na estação inverno-primavera. (SCAPIN-BUFFARA et al., 2018).

Uma outra alteração microclimática que pode ocorrer com o uso da cobertura plástica é a alteração da temperatura do ar (CHAVARRIA et al., 2007; CARDOSO et al., 2008). O incremento de 1°C nas temperaturas médias do ar foi observado em vinhedo de ‘Moscato Giallo’, conduzido em “Y” coberto em relação ao descoberto (CHAVARRIA et al., 2007). No entanto, até o presente momento, não era conhecido o efeito da cobertura plástica na temperatura das folhas de videira. Particularmente, a média diária da temperatura foliar de ‘Niagara Rosada’ não foi afetada pela cobertura plástica, no entanto, observou-se um aumento de cerca 1°C nos horários noturnos nas folhas sob a cobertura.

Apesar do desenvolvimento da ferrugem não ter sido afetado pelos sistemas de condução e pela cobertura plástica, esses sistemas tiveram um impacto significativo no desenvolvimento de outras importantes doenças da videira (ALMANÇA et al., 2017; CHAVARRIA et al., 2007; DE BEM et al., 2016, 2017; SCAPIN-BUFFARA et al., 2018). Em comparação com o YT, plantas conduzidas em VSP apresentaram menor AUDPC e menores taxas de progresso de incidência e severidade de míldio (*Plasmopara viticola*) e podridão-cinzenta da uva (*Botrytis cinerea*) (DE BEM et al., 2017). Além disso, a severidade e incidência desses mesmos patógenos foi reduzida substancialmente nas plantas sob cobertura plástica associada ao sistema YT (CHAVARRIA et al., 2007).

A arquitetura das plantas tornou-se um componente chave de uma estratégia de manejo integrado para importantes doenças da videira. Embora as consequências desse estudo impliquem que o sistema de condução e o uso da cobertura plástica não tiveram efeito significativo no desenvolvimento da doença, a dinâmica da ferrugem esteve associada principalmente com a disponibilidade de fonte de inóculo e as alterações nas condições climáticas entre safras. Portanto, para a produção de videira no Sudeste do Brasil, é crucial reduzir a fonte e o nível de inóculo para retardar o início da epidemia e reduzir a incidência e a severidade da doença.

## Referências

- AGRIOS, G. N. **Plant Pathology**. 5. th. Amsterdam: Elsevier Academic Press, 2005. p. 922.
- ALMANÇA, M. A. K.; FRIGHETTO, N. S.; TONELLO, J. C.; & LERIN, S. Diseases incidence and fungicide cost reduction with overhead covered grapes. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 39, 2017.

- ANGELOTTI, F., SCAPIN, C. R., TESSMANN, D. J., VIDA, J. B., VIEIRA, R. A., & DE SOUTO, E. R. Resistência de genótipos de videira à ferrugem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 9, p. 1129-1134, 2008a.
- ANGELOTTI, F., SCAPIN, C. R., TESSMANN, D. J., VIDA, J. B., OLIVEIRA, R. R., & CANTERI, M. G. Diagrammatic scale for assessment of grapevine rust. *Tropical Plant Pathology*, v. 33, n. 6, p. 439-443, 2008b.
- ANGELOTTI, F., SCAPIN, C. R., TESSMANN, D. J., VIDA, J. B., & CANTERI, M. G. The effect of temperature, leaf wetness and light on development of grapevine rust. **Australasian Plant Pathology**, v. 43, n. 1, p. 9-13, 2014.
- ANUÁRIO BRASILEIRO DE FRUTICULTURA. **Brazilian Horti&Fruti Year book**. Gazeta, Santa Cruz. 2021. Disponível em <<https://www.editoragazeta.com.br/produto/anuario-brasileiro-de-horti-fruti-2021/>>. Acesso em 21 de nov. 2021.
- BATISTA, C. D., BARBOSA, M. A. G., DE MOURA, M. S. B., & DOS ANJOS, J. B. Dinâmica de inóculos e doenças em videira sob sistema convencional e protegido. **Revista Caatinga**, v. 28, n. 2, p. 256-262, 2015.
- CAMARGO, U. A., TONIETTO, J., HOFFMANN, A. Progressos na viticultura brasileira. **Revista Brasileira de Fruticultura**, p.144-149, 2011.
- CAMPBELL, C. L.; MADDEN, L. V.; PENNYPACKER, S. P. Structural characterization of bean root rot epidemics. **Phytopathology**, v. 70, n. 2, p. 152-155, 1980.
- CARDOSO L. S.; BERGAMASCHI H.; COMIRAN F.; CHAVARRIA, G.; MARODIN, G. A. B.; DALMAGO, G. A.; ... & MANDELLI, F. Padrões de interceptação de radiação solar em vinhedos com e sem cobertura plástica. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 32, n. 1, p. 161-171, 2010.
- CHATASIRI, S.; ONO, Y. Phylogeny and taxonomy of the Asian grapevine leaf rust fungus, *Phakopsora euwitii*, and its allies (Uredinales). **Mycoscience**, v. 49, n. 1, p. 66-74, 2008.
- CHAVARRIA, G.; SANTOS, H. P. D.; SÔNEGO, O. R.; MARODIN, G. A. B.; BERGAMASCHI, H.; CARDOSO, L. S. Incidência de doenças e necessidade de controle em cultivo protegido de videira. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 29, p. 477-482, 2007.
- CHAVARRIA, G.; SANTOS, H. P. Manejo de videiras sob cultivo protegido. *Ciência Rural*, v. 39, n. 6, p. 1917-1924, 2009.
- COMIRAN, F., BERGAMASCHI, H., HECKLER, B. M. M., SANTOS, H.P., ALBA, D., SARETTA, E. Microclima e produção de videiras 'Niagara Rosada' em cultivo orgânico sob cobertura plástica. **Revista Brasileira de Fruticultura**. Vol. 34, n. 1, p. 152-159, 2012.
- COSTA, T.V., TARSITANO, M.A.A., CONCEIÇÃO, M.A.F. Caracterização social e tecnológica da produção de uvas para mesa em pequenas propriedades rurais da região de Jales-SP. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal - SP, v. 34, n. 2, p. 766-773, 2012.
- DE BEM, B. P.; BOGO, A.; EVERHART, S. E.; CASA, R. T.; GONÇALVES, M. J.; MARCON FILHO, J. L., ... & DA CUNHA, I. C. Effect of four training systems on the temporal dynamics of downy mildew in two grapevine cultivars in southern Brazil. **Tropical Plant Pathology**, v. 41, n. 6, p. 370-379, 2016.

- DE BEM, B.P.; BOGO A., ALLEBRANDT, R.; MARCON FILHO, J.L.; WURZ, D.A.; BRIGHENTI, A. F.; RUFATO, L. Botrytis bunch rot on 'Sauvignon Blanc' grapevine on the Y-trellis and vertical shoot-positioned training systems. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 52, p. 818-822, 2017.
- DE MENDIBURU, F. **Package 'agricolae'**. R Package, Version, v. 1, p. 3, 2019.
- GILLIGAN, C. A. Comparison of disease progress curves. **New Phytologist**, v. 115, n. 2, p. 223-242, 1990.
- GODOY, C. V.; AMORIM, L.; BERGAMIN, A. Influência da duração do molhamento foliar e da temperatura no desenvolvimento da ferrugem do milho causada por *Puccinia polysora*. **Fitopatologia Brasileira**, v. 24, n. 2, p. 160-165, 1999.
- HENNESSY, C. R.; DALY, A. M.; HEARNDEN, M. N. Assessment of grapevine cultivars for resistance to *Phakopsora euvitis*. **Australasian Plant Pathology**, v. 36, n. 4, p. 313-317, 2007.
- HERNANDES, J. L.; PEDRO JÚNIOR, M. J.; AND BLAIN, G. C. Fenologia e produção da videira 'Niagara Rosada' conduzida em manjedoura na forma de Y sob telado plástico durante as safras de inverno e de verão. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 33, p. 499-504, 2011.
- HOLB, I. J.; HEIJNE, B.; WITHAGEN, J. C. M.; GÁLL, J. M.; AND JEGER, M. J. Analysis of summer epidemic progress of apple scab at different apple production systems in the Netherlands and Hungary. **Phytopathology**, v. 95, n. 9, p. 1001-1020, 2005.
- IBGE (2021). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola: Censo Agro.** Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1618>>. Acesso em 11 de dez. 2021.
- IEA (2020). Instituto de Economia Agrícola. **Estatísticas da produção paulista.** Disponível em: <[http://ciagri.iea.sp.gov.br/nia1/subjectiva.aspx?cod\\_sis=1&idioma=1](http://ciagri.iea.sp.gov.br/nia1/subjectiva.aspx?cod_sis=1&idioma=1)>. Acesso em 19 de ago. 2021.
- JI, J. X.; LI, Z.; LI, Y.; AND KAKISHIMA, M. J. Life cycle of *Nothoravenelia japonica* and its phylogenetic position in Pucciniales, with special reference to the genus *Phakopsora*. **Mycological Progress**, v. 18, n. 6, p. 855-864, 2019.
- JOLLIFFE I. T. **Principal Component Analysis**. Springer, New York. 2002.
- KASSAMBARA, A.; MUNDT, F. **Factoextra: extract and visualize the results of multivariate data analyses**. R package version, v. 1, n. 5, p. 337-354, 2017.
- KARNOVSKY, M.J. A formaldehyde glutaraldehyde fixative of high osmolality for use in electron microscopy. **J. cell Biol**, v. 27, p. 1A-149A, 1965.
- KRANZ, J. Comparison of epidemics. **Annual Review of Phytopathology**, v. 12, n. 1, p. 355-374, 1974.
- LANDA, B. B.; NAVAS-CORTÉS, J. A.; JIMÉNEZ-DÍAZ, R. M. Integrated management of Fusarium wilt of chickpea with sowing date, host resistance, and biological control. **Phytopathology**, v. 94, n. 9, p. 946-960, 2004.
- LÊ, S.; JOSSE, J.; & HUSSON, F. FactoMineR: an R package for multivariate analysis. **Journal of statistical software**, v. 25, p. 1-18, 2008.

- LORENZ, D.H.; EICHHORN, K.W.; BLEIHOLDER, H.; KLOSE, R.; MEIER, U.; AND WEBER, E. Phenological growth stages of the grapevine (*Vitis vinifera* L. ssp. *vinifera*)-Codes and descriptions according to the extended BBCH scale. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, v. 1, n. 2, p. 100-103, 1995.
- MADDEN, L. V.; HUGHES, G.; AND VAN DEN BOSCH, F. **The study of plant disease epidemics**. The American Phytopathological Society, St. Paul, Minnesota. 2007.
- MADDEN, L.; PENNYPACKER, S. P. Principal component analysis of tomato early blight epidemics. **Journal of Phytopathology**, v. 95, n. 4, p. 364-369, 1979.
- MOHAPATRA, N. K.; MUKHERJEE, A. K.; RAO, A. S.; AND NAYAK, P. Disease progress curves in the rice blast pathosystem compared with the logistic and Gompertz models. **Journal of Agricultural and Biological Science**, v. 3, n. 1, p. 28-37, 2008.
- MORA-AGUILERA, G.; NIETO-ANGEL, D.; CAMPBELL, C. L.; TÉLIZ, D.; AND GARCÍA, E. Multivariate comparison of papaya ringspot epidemics. **Phytopathology**, v. 86, n. 1, p. 70-78, 1996.
- MUKHERJEE, A. K.; MOHAPATRA, N. K.; RAO, A. S.; & NAYAK, P. Effect of nitrogen fertilization on the expression of slow-blasting resistance in rice. **The Journal of Agricultural Science**, v. 143, n. 5, p. 385-393, 2005.
- NASERI, B.; SABETI, P. Analysis of the effects of climate, host resistance, maturity and sowing date on wheat stem rust epidemics. **Journal of Plant Pathology**, v. 103, n. 1, p. 197-205, 2021.
- NAVAS-CORTÉS, J. A.; HAU, B.; AND JIMÉNEZ-DÍAZ, R. M. Effect of sowing date, host cultivar, and race of *Fusarium oxysporum* f. sp. *ciceris* on development of Fusarium wilt of chickpea. **Phytopathology**, v. 88, n. 12, p. 1338-1346, 1998.
- ONO, Y. Taxonomy of the *Phakopsora ampelopsidis* species complex on vitaceous hosts in Asia including a new species, *P. euvitidis*. **Mycologia**, p. 154-173, 2000.
- ONO, Y., CHATASIRI, S., POTA, S., YAMAOKA, Y. *Phakopsora montana*, another grapevine leaf rust pathogen in Japan. **Journal of general plant pathology**, v. 78, n. 5, p. 338-347, 2012.
- ONO, Y., OKANE, I.; CHATASIRI, S.; POTA, S.; UNARTNGAM, J.; AYAWONG, C., ... AND LE, C. T. M. Taxonomy of Southeast Asian-Australasian grapevine leaf rust fungus and its close relatives. **Mycological Progress**, v. 19, n. 9, p. 905-919, 2020.
- PEDRO JÚNIOR, M. J.; HERNANDES, J. L.; ROLIM, G. S. Sistema de condução em Y com e sem cobertura plástica: microclima, produção, qualidade do cacho e ocorrência de doenças fúngicas na videira 'Niagara Rosada'. **Bragantia**, v. 70, n. 1, p. 228-233, 2011.
- PENNYPACKER S.P.; KNOBLE H.D.; ANTLE C.E.; AND MADDEN L.V. A flexible model for studying plant disease progression. **Phytopathology**, v. 70, p. 232-235, 1980.
- PRIMIANO, I. V., LOEHRER, M., AMORIM, L., SCHAFFRATH, U. Asian grapevine leaf rust caused by *Phakopsora euvitidis*: an important disease in Brazil. **Plant Pathology**, v. 66, n. 5, p. 691-701, 2017.
- RASERA, J. B.; AMORIM, L.; APPEZZATO-DA-GLÓRIA, B. Diverse effects of temperature on *in vivo* and *in vitro* germination of urediniospores of *Neophytophthora tropicalis*. **European Journal of Plant Pathology**, v. 162, n. 2, p. 501-507, 2022.

- R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2021. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>> .
- RICHARD, B.; JUMEL, S.; ROUAULT, F., & TIVOLI, B. Plant stage and organ age, two factors that affect pea (*Pisum sativum*) receptivity to ascochyta blight (*Mycosphaerella pinodes*). **European Journal of Plant Pathology**, v. 132, p. 367-379, 2012.
- SANCHEZ-RODRIGUEZ, L. A.; SPÓSITO, M. Bellato. Influence of the trellis/training system on the physiology and production of *Vitis labrusca* cv. Niagara Rosada in Brazil. **Scientia Horticulturae**, v. 261, p. 109043, 2020.
- SANTOS, R. F.; PRIMIANO, I. V.; AMORIM, L. Identification and pathogenicity of *Neophytophthora* species associated with Asian grapevine leaf rust in Brazil. **Plant Pathology**, v. 70, n. 1, p. 74-86, 2021.
- SCAPIN-BUFFARA, C. R., ANGELOTTI, F., DUFAULT, N. S., PEREIRA, C. B., & TESSMANN, D. J. Seasonal progression of leaf rust in 'Niagara Rosada' grapevine in a biannual crop system in Brazil. **European Journal of Plant Pathology**, p. 1-9, 2018.
- TECCHIO, J.F.S.; CAMARGO, U.A. Vitivinicultura brasileira: panorama setorial de 2010. Brasília: SEBRAE; Bento Gonçalves: IBRAVIN; Embrapa Uva e Vinho, 110 p., 2011.
- TESSMANN, D. J., DIANESE, J. C., GENTA, W., VIDA, J. B., MAY-DE MIO, L. L. Grape rust caused by *Phakopsora euvitidis*, a new disease for Brazil. **Fitopatologia Brasileira**, v. 29, n. 3, p. 338-338, 2004.
- TIVOLI, B., CALONNEC, A., RICHARD, B., NEY, B., ANDRIVON, D. Current knowledge on plant/canopy architectural traits that reduce the expression and development of epidemics. **European Journal of Plant Pathology**, v. 135, n. 3, p. 471-478, 2013.
- TWIZEYIMANA, M.; OJIAMBO, P. S.; HARTMAN, G. L.; AND BANDYOPADHYAY, R. Dynamics of soybean rust epidemics in sequential plantings of soybean cultivars in Nigeria. **Plant Disease**, v. 95, n. 1, p. 43-50, 2011.
- VAN MAANEN, A.; XU, X.-M. Modelling plant disease epidemics. **European Journal of Plant Pathology**, v. 109, n. 7, p. 669-682, 2003.
- VERNIERE, C. J.; GOTTWALD, T. R.; PRUVOST, Olivier. Disease development and symptom expression of *Xanthomonas axonopodis* pv. *citri* in various citrus plant tissues. **Phytopathology**, v. 93, n. 7, p. 832-843, 2003.

### 3. EFEITO DA LIMITAÇÃO HÍDRICA NA SEVERIDADE DA FERRUGEM, NA FISIOLOGIA E CRESCIMENTO DE VIDEIRAS

#### Resumo

Os cenários futuros das mudanças climáticas indicam probabilidade de aumento da predisposição de plantas a múltiplos estresses, tanto de natureza biótica quanto abiótica. O estresse causado pela seca poderá influenciar na suscetibilidade de plantas a patógenos, além de afetar diretamente o crescimento e produção de culturas. O presente trabalho teve como objetivo analisar os efeitos da interação do estresse biótico, causado pela infecção de *Neophytopella tropicalis*, e abiótico, causado por limitação hídrica, nas trocas gasosas e crescimento de videiras (*Vitis labrusca*). Mudanças de videira envasadas foram submetidas aos seguintes tratamentos: sem estresse ( $A^- B^-$ ), estresse abiótico por limitação na disponibilidade de água ( $A^+ B^-$ ), estresse biótico causado pela ferrugem ( $A^- B^+$ ) e estresses abiótico e biótico simultâneos ( $A^+ B^+$ ). Foram determinadas as características relacionadas à doença (frequência de infecção, severidade, área lesionada e produção de esporos), as características fisiológicas relacionadas às trocas gasosas (fotossíntese, condutância estomática e transpiração) e as de crescimento de plantas (área foliar, acúmulo de biomassa e carboidratos na parte aérea e nas raízes). Plantas submetidas aos estresses simultâneos apresentaram maior severidade da ferrugem, maior produção de esporos de *N. tropicalis* e maiores áreas de tecidos lesionados. Sintomas típicos de necrose internerval foram observados na interação *N. tropicalis* e limitação hídrica e foram discutidos no presente trabalho. A redução da condutância estomática e transpiração de plantas foi observada apenas nos tratamentos de estresse hídrico ( $A^+ B^-$  e  $A^- B^+$ ) e essas variáveis não foram alteradas em função unicamente de *N. tropicalis* ( $A^- B^+$ ). As taxas fotossintéticas das plantas foram reduzidas nos tratamentos  $A^+ B^-$  e  $A^- B^+$  em relação as plantas não estressadas. Contudo, a inibição da fotossíntese foi mais severa nas plantas submetidas aos estresses combinados ( $A^+ B^+$ ). Houve redução dos valores da área foliar, e na massa seca da parte aérea e das raízes no tratamento  $A^+ B^+$ , em relação ao tratamento  $A^- B^-$ . A diminuição da biomassa da raiz também foi observada nas plantas com estresse hídrico individual ( $A^+ B^-$ ). O aumento dos teores de glicose e redução nos teores de amido foram observados nos tratamentos  $A^+ B^-$  e  $A^- B^+$ , mas não em  $A^- B^-$ . O estresse hídrico isoladamente foi mais prejudicial na fisiologia e crescimento de plantas do que o impacto causado apenas pela ferrugem. Porém, quando há ocorrência simultânea desses estresses, os efeitos no desenvolvimento da doença, nas trocas gasosas, e no crescimento de plantas foram agravados.

**Palavras-chave:** *Neophytopella tropicalis*; estresse hídrico; trocas gasosas; *Vitis labrusca*.

#### Abstract

Future climate change scenarios will increase plants predisposition to multiple biotic and abiotic stresses. The stress caused by drought may influence the plants susceptibility to pathogens and affect crop growth and productivity. The

present work aimed to analyze the effects of the interaction of biotic stress, caused by *Neophytophthora tropicalis*, and abiotic stress, caused by water limitation, on gas exchange and grapevines growth (*Vitis labrusca*). Potted vine seedlings were submitted to the following treatments: no stress ( $A^- B^-$ ), abiotic stress due to limited water availability ( $A^+ B^-$ ), biotic stress caused by rust ( $A^- B^+$ ) and simultaneous abiotic and biotic stress ( $A^+ B^+$ ). Disease-related characteristics (infection frequency, severity, lesion area and spore production), physiological characteristics related to gas exchange (photosynthesis, stomatal conductance and transpiration) and plant growth characteristics (leaf area, accumulation of biomass and carbohydrates in shoots and roots). Plants subjected to simultaneous stresses showed greater rust severity, greater production of *N. tropicalis* spores and greater areas of lesioned tissues. Typical symptoms of interveinal necrosis were observed in the interaction between *N. tropicalis* and drought and were discussed in this present work. The reduction of stomatal conductance and transpiration of plants was observed only in the water stress treatments ( $A^+ B^-$  and  $A^+ B^+$ ) and these variables were not altered by *N. tropicalis* infection individually ( $A^- B^+$ ). Plant photosynthetic rates were reduced in treatments  $A^+ B^-$  and  $A^- B^+$  comparing to unstressed plants. However, photosynthesis inhibition was more severe in plants submitted to the combined stresses ( $A^+ B^+$ ). Reductions in the leaf area, shoots and roots dry mass were observed in treatment  $A^+ B^+$  in relation to treatment  $A^- B^-$ . The decrease in root dry mass was also observed in plants with individual water stress ( $A^+ B^-$ ). The increased levels in glucose and reduction in starch were observed in treatments  $A^+ B^-$  and  $A^+ B^+$ , but not in  $A^- B^+$ . Water stress individually was more harmful to plant physiology and growth than the impact caused by *N. tropicalis* alone. However, when these stresses occur simultaneously, the effects on disease development, gas exchange, and plant growth were exacerbated.

**Keywords:** *Neophytophthora tropicalis*; water stress; gas exchange; *Vitis labrusca*.

### 3.1 Introdução

A escassez de água é a principal restrição à produção agrícola haja vista que a água é essencial aos diversos processos metabólicos das plantas (DOORENBOS; KASSAM, 1979; FAROOQ et al., 2009). As mudanças nos padrões de precipitação e número de dias secos por ano estão causando o aparecimento frequente de secas ao redor do mundo e esta tendência deverá aumentar no futuro, de acordo com os cenários de mudança climática global (IPCC, 2014; LUTERBACHER et al., 2006; POTTER et al., 2008). Essas mudanças poderão influenciar o ambiente em micro e macro escalas e afetar diretamente o crescimento, a morfologia, a fisiologia e a predisposição das plantas a inúmeros estresses, tanto de natureza biótica quanto abiótica (CHAKRABORTY; NEWTON, 2011; COAKLEY et al., 1999; JONES, 2009).

O estresse hídrico é uma das principais restrições ambientais que limitam o desenvolvimento da videira e, conseqüentemente, a produção (KELLER, 2010). Em termos

gerais, as videiras são consideradas plantas moderadamente tolerantes à seca que apresentam uma diversidade de comportamentos hidráulicos e estomáticos dependendo da cultivar (CHAVES et al., 2010). No entanto, quando a água disponível do solo na profundidade efetiva da raiz está abaixo de 55-65%, as plantas são expostas ao estresse hídrico (DOORENBOS; KASSAM, 1979). Um dos efeitos mais notáveis do estresse hídrico é a diminuição da taxa fotossintética, devido principalmente ao fechamento estomático (FLEXAS et al., 2002). Como resultado, o crescimento de ramos e folhas é reduzido e a produtividade é impactada negativamente (CHACÓN-VOZMEDIANO et al., 2020).

Outro fator que contribui para redução da produção em videiras é a incidência de doenças na cultura. A ferrugem da videira, causada por *Neophytophthora tropicalis* (syn: *Phakopsora euvitis*), é uma doença destrutiva, especialmente em regiões tropicais e subtropicais (PRIMIANO et al., 2017 ; SANTOS et al. 2020). Essa doença pode causar danos diretos na fotossíntese, mesmo em baixas severidades (NOGUEIRA JÚNIOR et al., 2017). Além disso, a queda prematura da folha provocada pela ferrugem prejudica o acúmulo de carboidratos nas raízes e, como resultado, o porta-enxerto fica enfraquecido, prejudicando a produção da safra seguinte (NOGUEIRA JÚNIOR et al., 2017).

O estresse hídrico pode contribuir para a maior suscetibilidade das plantas a patógenos devido às respostas fisiológicas ao estresse que aumentam a expressão dos sintomas de diversas doenças (CHOI et al., 2013; DESPREZ-LOUSTAU et al., 2006; ELAD; PERTOT, 2014; MAYEK-PEREZ et al., 2002; MCELRONE et al., 2003). No entanto, em alguns casos, o estresse hídrico poderá desencadear resposta de resistência nas plantas contra os patógenos (ACHUO et al. 2006; RAMEGOWDA et al. 2013). A ocorrência simultânea do estresse hídrico e patógenos resulta em respostas complexas, controladas por diferentes vias de sinalização de hormônios, que podem interagir e inibir umas às outras (ATKINSON; URWIN, 2012; PRASCH; SONNEWALD, 2013). A combinação entre estresse hídrico e patógenos também pode alterar características fisiológicas como fotossíntese, condutância estomática e taxa de transpiração; além das características de crescimento de plantas como acúmulo de biomassa, crescimento da parte aérea e morfologia radicular (IRULAPPAN; SENTHIL-KUMAR, 2018; SINHA et al., 2019).

Há um número abrangente de estudos que visam compreender a interação simultânea de estresse por seca e patógenos (e.g. ACHUO et al., 2006; ATKINSON; URWIN, 2012; CHOI et al., 2013; HOSSAIN et al., 2019; KISSOUDIS et al., 2014; MA et al., 2001; MAYEK-PEREZ et al., 2002; MCELRONE et al., 2003; PRASCH; SONNEWALD, 2015; RAMEGOWDA et al., 2013; SINHA et al., 2019). Contudo, poucos trabalhos deram enfoque

no efeito da interação de seca e patógenos causadores de ferrugem (AYRES, 1977; BETHENOD et al., 2001; PAUL; AYRES, 1984; SHISHKOFF; BRUCKART, 1996; RIBEIRO et al., 2022). Uma vez que esses patógenos se nutrem de tecidos vegetais vivos, qualquer mudança do hospedeiro, decorrente de estresse hídrico, pode alterar a interação patógeno-hospedeiro (ZHANG; SONNEWALD, 2017).

A interação entre a seca e a infecção por patógenos é um processo que afeta vários aspectos metabólicos das plantas e, conseqüentemente, não pode ser entendido pelo estudo das respostas das plantas à seca ou infecção por patógenos isoladamente (CHOI et al., 2013). Entender o impacto real dos estresses combinados é extremamente necessário para a melhor compreensão de como as epidemias de doenças poderão ser alteradas no futuro, em razão das mudanças climáticas que se avizinham. Esses resultados serão úteis para a incorporação em modelos de previsão considerando cenários futuros para várias regiões afetadas pela seca (GHINI, 2005); além de mitigar perdas mais severas, com a adoção de estratégias de controle ou técnicas adaptadas para superar o efeito do estresse combinados.

Já é conhecido que tanto a infecção por *N. tropicalis* quanto a ocorrência do estresse hídrico, quando ocorrem isoladamente, podem afetar as trocas gasosas de videira (CHAVES et al., 2010; FLEXAS et al., 2002; NAVARRO et al., 2019; NOGUEIRA JÚNIOR et al., 2018). Contudo o efeito desses estresses combinados ainda não foi elucidado. A ocorrência simultânea desses estresses pode gerar um custo de aptidão em termos de crescimento das plantas devido à realocação de recursos entre crescimento e respostas de defesa que precisam ser determinados e compreendidos. Dessa maneira, o objetivo do presente estudo foi investigar os efeitos, combinados e individuais, do estresse hídrico e da infecção por *N. tropicalis*, no desenvolvimento da ferrugem, nas trocas gasosas e no crescimento de videiras.

## **3.2 Material e métodos**

### **3.2.1 Obtenção das mudas**

Mudas de videira cv. Niagara Rosada enxertadas sobre o porta-enxerto IAC 766 foram transferidas para vasos plásticos de 7 dm<sup>3</sup> cada qual contendo substrato esterilizado de textura arenosa, cuja características físico-químicas estão descritas na Tabela 10. As plantas foram conduzidas em haste única e foram despontadas (poda apical) acima da oitava folha expandida.

Até o início da imposição da limitação hídrica (do transplante das mudas até ao início do experimento), todos os vasos foram mantidos em casa de vegetação com conteúdo de água do solo próximo à capacidade de campo (CC), ou seja, na capacidade máxima de água que o solo é capaz de reter após o excesso ter sido drenado. Segundo Casaroli e Jong Van Lier (2008),

o termo “capacidade de vaso (CV)” é utilizado analogicamente ao conceito de CC em ensaios com plantas envasadas e, portanto, será referido adiante dessa maneira.

**Tabela 10** - Análise química e física (granulométrica) da mistura utilizada como substrato nos experimentos.

<b>P resina<sup>a</sup></b> mg dm <sup>-3</sup>	<b>K</b>	<b>Ca</b>	<b>Mg</b>	<b>H+Al</b> mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	<b>Al</b>	<b>Soma de bases</b>	<b>CTC<sup>b</sup></b>
72,0	8,0	58,0	17,0	13,0	2,0	83,0	96,0
<b>Sat bases</b> V%	<b>Sat, Al</b> m%	<b>S S0<sub>4</sub></b> mg dm <sup>-3</sup>	<b>Cu</b>	<b>Fe</b>	<b>Zn</b> mg/dm <sup>3</sup>	<b>Mn</b>	<b>B</b>
86,0	2,0	21,0	1,5	20,8	13,2	10,0	1,0
<b>pH</b>	<b>M<sub>2</sub>O</b> g dm <sup>-3</sup>	<b>Argila</b>	<b>Silte</b>	<b>Areia Total</b> g kg <sup>-1</sup>	<b>Areia Grossa</b>	<b>Areia Fina</b>	
5,6	37,0	113,0	17,0	870,0	560,0	310,0	

<sup>a</sup> A extração de fósforo do substrato foi realizada pelo método P resina, com resina de troca iônica (RAIJ, 1978).

<sup>b</sup> CTC é a capacidade de troca catiônica do substrato.

### 3.2.2 Determinação das necessidades hídricas de videira

Para a determinação do conteúdo de água na capacidade de vaso ( $U_{cv}$ ), seis vasos contendo as mudas de ‘Niagara Rosada’ foram mantidos por 24 h em uma caixa d’água contendo um volume de água equivalente a 2/3 da altura dos vasos para saturação do solo correspondente em cada vaso (Fig. 12). Após este processo, os vasos foram colocados sob um suporte vazado por 48 horas para drenagem da água excedente e, em seguida, foram pesados para determinação da massa do vaso na CV, em quilogramas (CASAROLI; JONG VAN LIER, 2008). A fim de evitar perda de água pela evapotranspiração, todas as plantas foram cobertas com saco plástico transparente até o final da drenagem do solo (Fig. 12).

Concomitantemente, o conteúdo de água do solo foi determinado pelo método gravimétrico (TEIXEIRA et al., 2017). Para isso, uma amostra de solo indeformada de cada vaso foi coletada em um cilindro com volume ( $V$ ) de 54,95 cm<sup>3</sup>, onde imediatamente foi obtida a massa úmida do conjunto ( $M_u$ ). A secagem da amostra foi efetuada em estufa a 60 ° C por 48 h e a massa do conjunto foi novamente mensurada, obtendo-se assim a massa seca da amostra ( $M_s$ ). O conteúdo de água do solo com base em massa, ou seja, a umidade gravimétrica ( $U$ ) foi determinado pela relação expressada na Eq. 8.

$$U_{cv} = \left( \frac{M_u - M_s}{M_s} \right) \cdot 100 \quad (8)$$

em que,  $U_{cv}$  é a umidade gravimétrica na capacidade de vaso ( $\text{kg}_{\text{água}} \text{kg}_{\text{solo}}^{-1}$ );  $M_u$  é a massa úmida (kg) e  $M_s$  é a massa seca (kg).

**Figura 12.** Etapas da metodologia de experimento com estresse hídrico. (A) Plantas de videira ‘Niagara Rosada’ na casa-de-vegetação (B) saturação do solo, (B) drenagem do solo saturado para os cálculos de disponibilidade hídrica.



Fonte: O autor

A umidade no ponto de murcha permanente ( $U_{PMP}$ ) foi determinada em câmaras de Richards, na tensão de  $-1.500 \text{ kPa}$  ( $\text{g g}^{-1}$ ) (Teixeira et al., 2017), pelo Laboratório de Física do Solo da Divisão de Funcionamento de Ecossistemas Tropicais do CENA-USP. Após a determinação do  $U_{PMP}$  e  $U_{cv}$ , foi possível determinar a Capacidade de Água Disponível no solo (CAD) (Eq. 9). A CAD é a água no solo que está retida entre a umidade da capacidade de campo (CC) e a umidade do ponto de murcha permanente (PMP), então:

$$CAD = U_{cv} - U_{PMP} \quad (9)$$

em que,  $U_{CV}$  é a umidade gravimétrica na capacidade de vaso ( $\text{kg}_{\text{água}} \text{kg}_{\text{solo}}^{-1}$ ) e  $U_{PMP}$  é umidade gravimétrica no ponto de murcha permanente ( $\text{kg}_{\text{água}} \text{kg}_{\text{solo}}^{-1}$ ).

A medida em que há absorção de água pelo sistema radicular das plantas, o potencial da água no solo diminui e a extração da água restante pelas raízes torna-se mais difícil. Dessa forma, nem toda fração da CAD está prontamente disponível para as plantas e, portanto, para que o conteúdo de água no solo não atinja o PMP, utiliza-se o conceito de Água Facilmente Disponível (AFD) (ALBUQUERQUE, 2010). A AFD representa a lâmina de água que a planta pode consumir entre duas irrigações sucessivas, sem com que ocorra o estresse hídrico (Eq. 10).

$$AFD = CAD \cdot f \quad (10)$$

em que: CAD é a capacidade de água disponível ( $\text{kg}_{\text{água}} \text{kg}_{\text{solo}}^{-1}$ ) e  $f$  é o fator de disponibilidade hídrica (proporção).

O fator  $f$  define a umidade crítica do solo à qual a planta pode ser submetida sem que ocorra redução da produção (ALBUQUERQUE, 2010). Para uvas de mesas, o valor recomendado de  $f$  é de 0,50, ou seja, se o solo estiver com umidade abaixo de 50% da CAD, as plantas serão submetidas ao estresse hídrico (POMMER, 2003). Embora o fator  $f$  para uvas de mesa esteja disponível na literatura, esse valor pode sofrer alterações de acordo com as condições de solo-planta-atmosfera em que os ensaios são conduzidos. Portanto, o valor de  $f$  foi determinado em um ensaio preliminar para as condições específicas desse estudo e a metodologia encontra-se descrita a seguir.

### 3.2.3 Determinação do fator de disponibilidade hídrica em mudas envasadas de ‘Niagara Rosada’.

Os tratamentos de disponibilidade hídrica foram estabelecidos com base na CAD e na AFD do solo, determinadas de acordo com as Equações 9 e 10 (ALBUQUERQUE, 2010; TEIXEIRA et al., 2017). Para isso, as plantas envasadas de ‘Niagara Rosada’ foram mantidas em casa de vegetação com umidades correspondentes a 30, 40 e 80% da CAD. Foram utilizadas três plantas (repetições) para cada nível de disponibilidade hídrica.

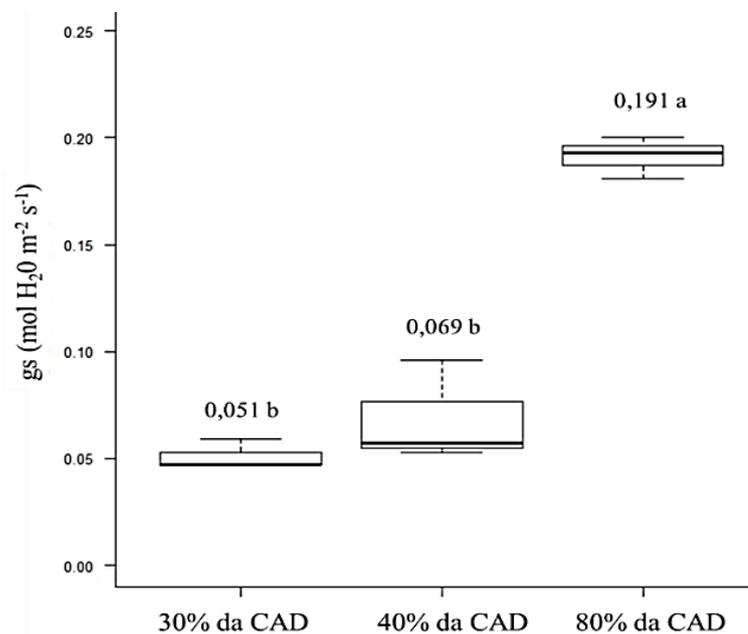
O controle da disponibilidade hídrica para as plantas foi realizado diariamente, por meio da pesagem dos vasos, em balança com capacidade de 10 kg. A quantidade de reposição da água evapotranspirada foi calculada a partir da diferença entre a massa do vaso nos

tratamentos hídricos e a massa obtida no dia da avaliação (massa atual). A reposição de água foi realizada sempre que a massa atual dos vasos era inferior à massa determinada para o nível de umidade aplicado.

Quando todas as plantas atingiram os níveis de umidade, foram determinados os valores de assimilação líquida de CO<sub>2</sub> ( $A$ ,  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), a condutância estomática ( $g_s$ ,  $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), a concentração intercelular de CO<sub>2</sub> ( $C_i$ ,  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) e a transpiração ( $E$ ,  $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), em uma área de 2 cm<sup>2</sup> de uma folha por planta. As trocas gasosas foram obtidas por meio de um analisador portátil de gás infravermelho (IRGA) (Li-6400 XT, LI-COR Inc., Lincoln, NE, EUA).

Para identificar a umidade crítica (fator  $f$ ), os valores de  $g_s$  foram utilizados como referência. O valor de  $g_s$  é um eficiente indicador de estresse hídrico uma vez que o fechamento estomático é uma das primeiras respostas fisiológicas das plantas nessa condição (CHAVES et al., 2003). A partir dos resultados, definiu-se o fator  $f$  de 0,40 (40% da CAD) como nível de estresse moderado, uma vez que esse tratamento foi suficiente para causar redução significativa dos valores de  $g_s$  em relação as plantas sem limitação hídrica (80% da CAD) (Fig. 13, Apêndice C).

**Figura 13.** Condutância estomática de plantas de ‘Niagara Rosada’ submetidas a diferentes capacidades de água disponível no solo.



Fonte: O autor

### 3.2.4 Definição dos tratamentos de estresse biótico e abiótico

Os experimentos foram instalados em delineamento inteiramente casualizado e repetidos duas vezes, considerando-se os seguintes tratamentos:

- plantas sem estresse, ou seja, sadias sob 80% da CAD ( $A^- B^-$ );
- plantas com estresse abiótico individualmente, ou seja, sadias sob 40% da CAD ( $A^+ B^-$ );
- plantas com estresse biótico individualmente, ou seja, inoculadas com *Neophytophthora tropicalis* sob 80% da CAD ( $A^- B^+$ ); e
- plantas com estresse biótico e abiótico combinados, ou seja, inoculadas com *N. tropicalis* sob 40% da CAD ( $A^+ B^+$ ).

Foram utilizadas cinco plantas (repetições) em cada tratamento. Antes de cada experimento, os seis vasos em que foram determinadas as massas dos vasos na CV (descritos no item 3.2.2) foram considerados como “vasos controladores de umidade” (100% da CAD). Esses vasos foram pesados diariamente em balança de 10 kg para obtenção da massa média do vaso na CV ( $M_{CV}$ , kg). A  $M_{CV}$  foi utilizada como referência para os cálculos de reposição de água diária nos vasos com 40% e 80% da CAD. As plantas, aclimatadas previamente na casa

de vegetação, foram transferidas para sala de incubação assim que os níveis de 40% e 80% da CAD foram atingidos em todos os vasos.

Para os tratamentos com inoculação, folhas doentes de videira contendo urediniósporos de *N. tropicalis* foram imersas em 200 ml de água destilada com Tween 20 (0,05%) e a superfície abaxial foi raspada com uma escova dental macia para retirada dos esporos. A suspensão resultante foi filtrada com uma peneira e a concentração de esporos (urediniósporos) foi ajustada para  $5 \times 10^4 \text{ ml}^{-1}$ , com auxílio de um hemocítmetro. Suspensões de urediniósporos foram pulverizadas na superfície abaxial das folhas sadias até o escorrimento superficial, utilizando-se uma bomba de vácuo equipada com um bocal de coleta de vidro (*spray nozzle*). Após a inoculação, as plantas foram seladas em sacos de plástico para manter a umidade relativa acima de 90% e mantidas no escuro por 24 horas com temperatura de 25 °C. Para os tratamentos sem inoculação (plantas sadias), as plantas foram pulverizadas com água destilada deionizada acrescidas com Tween 20 (0,05%) e mantidas por 24 horas nas mesmas condições das mudas inoculadas.

Para aferir a viabilidade do inóculo utilizada nos experimentos, uma alíquota de 100 µl de cada suspensão (utilizadas na inoculação) foi transferida e espalhada com alça de Drigalski para placas contendo meio ágar-água (2%). As placas foram incubadas a 25°C no escuro, e após 24 horas, a germinação foi paralisada com lactoglicerol. A porcentagem de germinação dos urediniósporos foi determinada em microscopia de luz, examinando-se 100 urediniósporos por placa. Foram considerados germinados os urediniósporos que apresentavam tubo germinativo com comprimento de pelo menos 1,5 vezes maior que comprimento do urediniósporos.

Durante o período do experimento, as mudas foram transferidas novamente para casa de vegetação com ventilação forçada, e a temperatura e umidade relativa do ar foram monitoradas a cada 60 minutos por meio de um *datalogger* (Novus®, modelo LogBox-RHT-LCD).

### **3.2.5 Avaliação das variáveis de trocas gasosas de videira**

As avaliações das trocas gasosas foram realizadas em uma área delimitada de 2 cm<sup>2</sup> de uma folha por planta localizada no terço médio (entre a 4<sup>o</sup> e 6<sup>o</sup> folha). Foram determinados os valores de *A*, *g<sub>s</sub>*, *E* e *C<sub>i</sub>* utilizando-se o aparelho IRGA modelo Li 6400 XT (LI-COR Inc., Lincoln, NE, EUA). Durante todas as medições das trocas gasosas, as plantas foram avaliadas sob pressão parcial de CO<sub>2</sub> no ar (*C<sub>a</sub>*) de 400 µmol mol<sup>-1</sup> e sob densidade de fluxo de fótons fotossintéticos (PPFD) de 1000 µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>. As avaliações foram realizadas antes da

inoculação (0 DAI), 48 horas após a inoculação (2 DAI) e, semanalmente, após o início dos primeiros sintomas. Todas as medições foram realizadas no período entre 9:00 e 10:00 horas da manhã.

### 3.2.6 Avaliação das variáveis relacionadas à ferrugem

Foram estimadas as seguintes variáveis: a frequência de infecção ( $n^{\circ}$  pústulas  $\text{cm}^{-2}$ ); a severidade da ferrugem (área foliar abaxial ocupada pelas pústulas, %); área lesionada (área foliar adaxial ocupada pela necrose e/ou clorose dos tecidos, %); período de latência (tempo entre a inoculação e o surgimento das pústulas, dias) e a produção de esporos ( $n^{\circ}$  esporos  $\text{ml}^{-1} \text{cm}^{-2}$ ).

Em cada avaliação das trocas gasosas, foram obtidas imagens digitais da área foliar de 2  $\text{cm}^2$  medida pelo IRGA. As imagens foram processadas pelo software Quant (VALE et al., 2001), para estimativa da severidade da ferrugem e da área lesionada e, pelo ImageJ, para determinação da frequência de infecção.

Ao final do experimento, as mesmas folhas utilizadas para as medições das trocas gasosas foram coletadas e, um disco foliar de 2  $\text{cm}^2$  de diâmetro foi recortado de cada folha, com o auxílio de um furador de metal de mesmo diâmetro. Os discos foliares contendo os esporos de *N. tropicalis* foram transferidos para tubos Falcon de 10 ml contendo 1 ml de água destilada e 20  $\mu\text{l}$  de lactoglicerol (para impedir a germinação). Os tubos foram agitados em vórtex por um minuto e três alíquotas da suspensão resultante foram coletadas para determinar a produção média de urediniósporos. Os esporos produzidos em cada disco foliar foram contabilizados com auxílio de um hemocitômetro em microscopia ótica (100x).

### 3.2.7 Avaliação dos parâmetros de crescimento de videiras

No encerramento de cada experimento, as plantas de cada vaso foram separadas em diferentes frações (folha, caule, pecíolo e raízes). As raízes, em especial, foram retiradas cuidadosamente do solo, lavadas (para retirada das partículas de solo) e secas ao ar livre por aproximadamente três horas. As folhas separadas de cada planta foram utilizadas primeiramente para mensuração da área foliar (AF,  $\text{cm}^2$ ), utilizando o equipamento LI-COR (modelo Li-2000). Posteriormente, as raízes e a parte aérea (ramos, pecíolos e folhas) foram acondicionadas em sacos de papel pré-identificados os quais foram transferidos para secar em estufa de circulação de ar forçada à 60 °C por 48 horas. Após a obtenção da massa seca constante, as amostras de raízes e da parte aérea foram pesadas em balança analítica para

determinação da massa seca (MS, g planta<sup>-1</sup>). Em seguida, foi feita a moagem das amostras em moinho tipo WILLY (macro) equipado com peneira de 20 mesh.

Para a determinação dos açúcares solúveis totais (AST, mg g<sup>-1</sup>) e da sacarose (SAC, mg g<sup>-1</sup>), as amostras moídas foram extraídas em solução de metanol: clorofórmio: água (MCW) (BIELESKI; TURNER, 1966). Para obter uma solução de MCW na proporção 12:5:3, utilizou-se 120 ml de metanol, 50 ml de clorofórmio e 30 ml de água Milli-Q® autoclavada. Em seguida, uma alíquota de 3 ml da solução de MCW foi transferida para tubos de rosca contendo 75 mg da amostra MS previamente moída. Os tubos foram levados e mantidos no refrigerador por 48 horas. Após esse período, os tubos foram preenchidos com 1,8 ml de clorofórmio e 1,2 ml de água Milli-Q®. O sobrenadante resultante de cada tubo foi coletado com pipeta de Pasteur e levado ao banho-maria (50 °C) para evaporação dos resíduos de clorofórmio e metanol. Os extratos resultantes foram transferidos para tubos eppendorfs de 1,5 ml e mantidos em congelador a -20°C para serem utilizados posteriormente nas análises de quantificação de açúcares.

A quantificação dos teores de AST e SAC foi realizada pelo método colorimétrico fenol-sulfúrico utilizando como padrão a glicose (DUBOIS et al., 1956) e a sacarose (VAN HANDEL, 1968), respectivamente. Para determinação do teor de AST, adicionaram-se, em tubos de ensaios, 10 µl de extrato, 490 µl de água, 500µl de solução de fenol 5% e 2 ml de ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Para SAC, os tubos de ensaio foram constituídos com 15 µl de extrato, 485 µl de água destilada e 500 µl de solução de hidróxido de potássio (KOH) 30%. Antes da adição de 500 µl de solução de fenol 5% e 2 ml de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, os tubos foram levados a banho maria à 96° C por 10 minutos. Após o resfriamento dos tubos, foi feita a leitura da absorbância das amostras em espectrofotômetro (Hitachi U 1900) no comprimento de onda de 490 nm.

Os teores de amido foram quantificados apenas para as amostras de raízes pelo laboratório de bromatologia do Departamento de Zootecnia, da ESALQ/USP, utilizando método enzimático (996-11) (ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS, 1995).

### 3.2.8 Análises estatísticas

Os valores de trocas gasosas (*A*, *gs*, *Ci* e *E*) e os de crescimento das plantas (MS, AF, AST, SAC e amido) foram comparados entre os tratamentos pelo teste de Kruskal-Wallis ( $X^2 > 0,05$ ). A área abaixo da curva padronizada (AUCs) para os valores de *A* e *E* foram calculados por integração trapezoidal, considerando o tempo em segundos e um fotoperíodo de 12 horas (MADDEN et al., 2007). Adicionalmente, as AUCs foram calculadas para os valores

de frequência de infecção, severidade e área lesionada e foram padronizadas pela quantidade de dias após inoculação (DAI) (MADDEN et al., 2007). Os valores de frequência de infecção, severidade, área lesionada e a produção de esporos de *N. tropicalis* foram comparados entre os tratamentos pelo teste-*t* ( $P > 0,05$ ). Todas as análises foram realizadas no software R versão 4.1.1 (R Core Team, 2021).

### 3.3 Resultados

#### 3.3.1 Variáveis relacionadas às trocas gasosas de videira

No primeiro experimento, a temperatura média da casa de vegetação foi de  $25 \pm 3$  °C e umidade relativa do ar de  $81 \pm 9\%$ . No segundo experimento, a temperatura média foi de  $27 \pm 5$  °C e umidade relativa do ar de  $58 \pm 15\%$ .

No início do experimento (sete dias antes da inoculação) em que todas as plantas estavam nas mesmas condições, todos os parâmetros de trocas gasosas ( $A$ ,  $g_s$  e  $C_i$  e  $E$ ) não mostraram diferenças significativas entre os tratamentos analisados ( $X^2 < 0,05$ ). Reduções significativas nas taxas fotossintéticas ( $A$ ) devido à ferrugem foram observadas a partir do início dos primeiros sintomas (Fig. 14 A e E). No experimento 1, a fotossíntese líquida média aos 32 DAI foi  $7,4 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  nas mudas não estressadas ( $A^- B^-$ ); de  $4,1 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  nas mudas apenas com o estresse hídrico ( $A^+ B^-$ ); de  $6,0 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  nas mudas apenas com o estresse causado pelo patógeno ( $A^- B^+$ ); e de  $4,27 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  nas mudas com os estresses simultâneos ( $A^+ B^+$ ). No experimento 2, houve redução de até sete vezes nos valores de  $A$  nas plantas submetidas ao tratamento  $A^+ B^+$  ( $A = 1,47 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) em relação as plantas não estressadas ( $A = 11,6 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ). Os valores de  $A$  entre os tratamentos  $A^+ B^-$  e  $A^- B^+$  não diferiram estatisticamente e foram ambos de aproximadamente  $6,0 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . A área abaixo da curva (AUCs) dos valores de  $A$  diferiu entre os diferentes tratamentos nos dois experimentos e a maior e menor AUC foi observada nos tratamentos  $A^- B^-$  e  $A^+ B^+$ , respectivamente (Tabela 11).

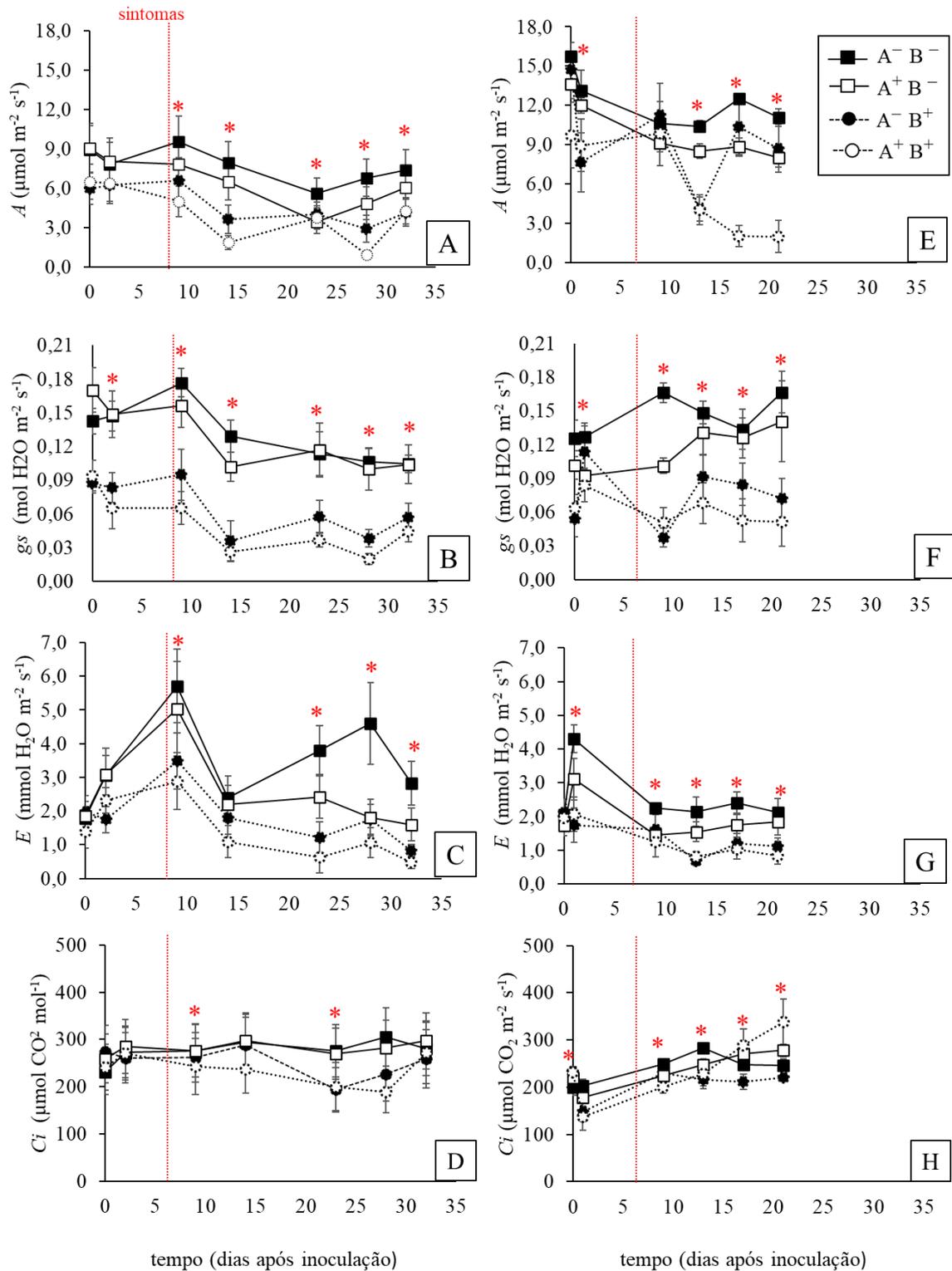
A partir da inoculação (0 DAI), os valores de  $g_s$  diferiram entre os tratamentos em todas as datas avaliadas dos dois experimentos ( $X^2 < 0,05$ ) (Fig. 14 B e F). Tanto no experimento 1 quanto no experimento 2, foram observados valores de  $g_s$  sempre inferiores nos tratamentos com o estresse hídrico ( $A^+ B^-$  e  $A^+ B^+$ ) em relação aos demais tratamentos ( $A^- B^-$  e  $A^- B^+$ ). Ao final do experimento 1 (32 DAI), os valores de  $g_s$  foram maiores que  $0,09 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  nas plantas submetidas aos tratamentos  $A^- B^-$  e  $A^- B^+$  e menores que  $0,06 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  nas plantas com os tratamentos  $A^+ B^-$  e  $A^+ B^+$ . O mesmo padrão nos valores de  $g_s$  foi observado

aos 21 DAI do experimento 2. As plantas submetidas ao estresse hídrico apresentaram valores de  $g_s$  significativamente inferiores ( $0,05 < g_s < 0,07 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) aos valores de  $g_s$  nos tratamentos sem o estresse hídrico ( $0,141 < g_s < 1,67 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ).

Ao final dos dois experimentos, os valores da transpiração das plantas nos tratamentos  $A^- B^-$  e  $A^- B^+$  foram maiores que  $2,0 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , valores significativamente superiores aos encontrados nos tratamentos  $A^+ B^-$  e  $A^+ B^+$  ( $E < 1,4 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) (Fig. 14 C e G). Os valores de AUCs das curvas de  $E$  para os dois experimentos também foram significativamente menores nas plantas de ‘Niagara Rosada’ submetidas aos tratamentos com limitação hídrica ( $A^+ B^-$  e  $A^+ B^+$ ) em relação aos valores da AUCs dos demais tratamentos. Porém não houve diferenças nos valores de AUCs de  $E$  entre as mudas inoculadas ( $A^- B^+$  e  $A^+ B^+$ ) em relação as sadias ( $A^- B^-$  e  $A^+ B^-$ ), nos dois experimentos avaliados (Tabela 11).

No experimento 1, os valores de concentração intercelular de  $\text{CO}_2$  ( $C_i$ ) não diferiram entre os tratamentos na maioria das datas de avaliação ( $X^2 < 0,05$ ). Ao final do experimento 2 (21 DAI), os maiores valores de  $C_i$  foram observados no tratamento  $A^+ B^+$  ( $C_i = 403,8 \text{ } \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) (Fig. D e H).

**Figura 14.** Valores médios de assimilação líquida de CO<sub>2</sub> (*A*), condutância estomática (*g<sub>s</sub>*), transpiração (*E*) e de concentração intercelular de CO<sub>2</sub> (*C<sub>i</sub>*) de plantas de ‘Niagara Rosada’ obtidos no experimento 1 (A-C) e no experimento 2 (D-F). As plantas foram submetidas aos seguintes tratamentos: sem estresse (A<sup>-</sup>B<sup>-</sup>), estresse abiótico (A<sup>+</sup>B<sup>-</sup>), estresse biótico pela ferrugem (A<sup>-</sup>B<sup>+</sup>) e estresses abiótico e biótico simultâneos (A<sup>+</sup>B<sup>+</sup>). Asteriscos em vermelho indicam diferenças significativas entre os tratamentos pelo teste de Kruskal-Wallis ( $X^2 > 0,05$ ).



Fonte: O autor

**Tabela 11** - Valores da área abaixo da curva padronizada (AUCs) para a assimilação líquida de CO<sub>2</sub> (A) e para transpiração (E) de plantas de ‘Niagara Rosada’ submetidas a diferentes tratamentos.

Tratamento <sup>a</sup>	Experimento 1 <sup>b</sup>				Experimento 2 <sup>b</sup>			
	AUCs A		AUCs E		AUCs A		AUCs E	
	$\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}$		$\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2}$		$\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}$		$\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2}$	
A <sup>-</sup> B <sup>-</sup>	8,35	a	3,84	a	11,17	a	2,29	a
A <sup>+</sup> B <sup>-</sup>	5,10	c	2,15	b	8,58	b	1,47	b
A <sup>-</sup> B <sup>+</sup>	6,69	b	3,30	a	8,45	b	2,01	a
A <sup>+</sup> B <sup>+</sup>	3,98	c	1,41	b	4,21	c	1,30	b

<sup>a</sup> As plantas foram submetidas aos seguintes tratamentos: sem estresse (A<sup>-</sup>B<sup>-</sup>), estresse abiótico (A<sup>+</sup>B<sup>-</sup>), estresse biótico pela ferrugem (A<sup>-</sup>B<sup>+</sup>) e estresses abiótico e biótico simultâneos (A<sup>+</sup>B<sup>+</sup>).

<sup>b</sup> Médias seguidas da mesma letra em coluna não diferem entre si pelo teste de Kruskal-Wallis ( $X^2 > 0,05$ ).

### 3.3.2 Variáveis relacionadas à ferrugem da videira

Os urediniósporos na suspensão utilizada como inóculo de *N. tropicalis* nos experimentos 1 e 2 tiveram germinação *in vitro* de 28% e 71%, respectivamente. Essas diferenças entre as germinações tiveram grande influência na proporção da doença entre os experimentos. Os valores médios das variáveis relacionadas à doença (frequência de infecção, severidade, área lesionada e produção de esporos) foram significativamente superiores no experimento 2 em relação ao experimento 1 (Fig. 15; Fig. 16).

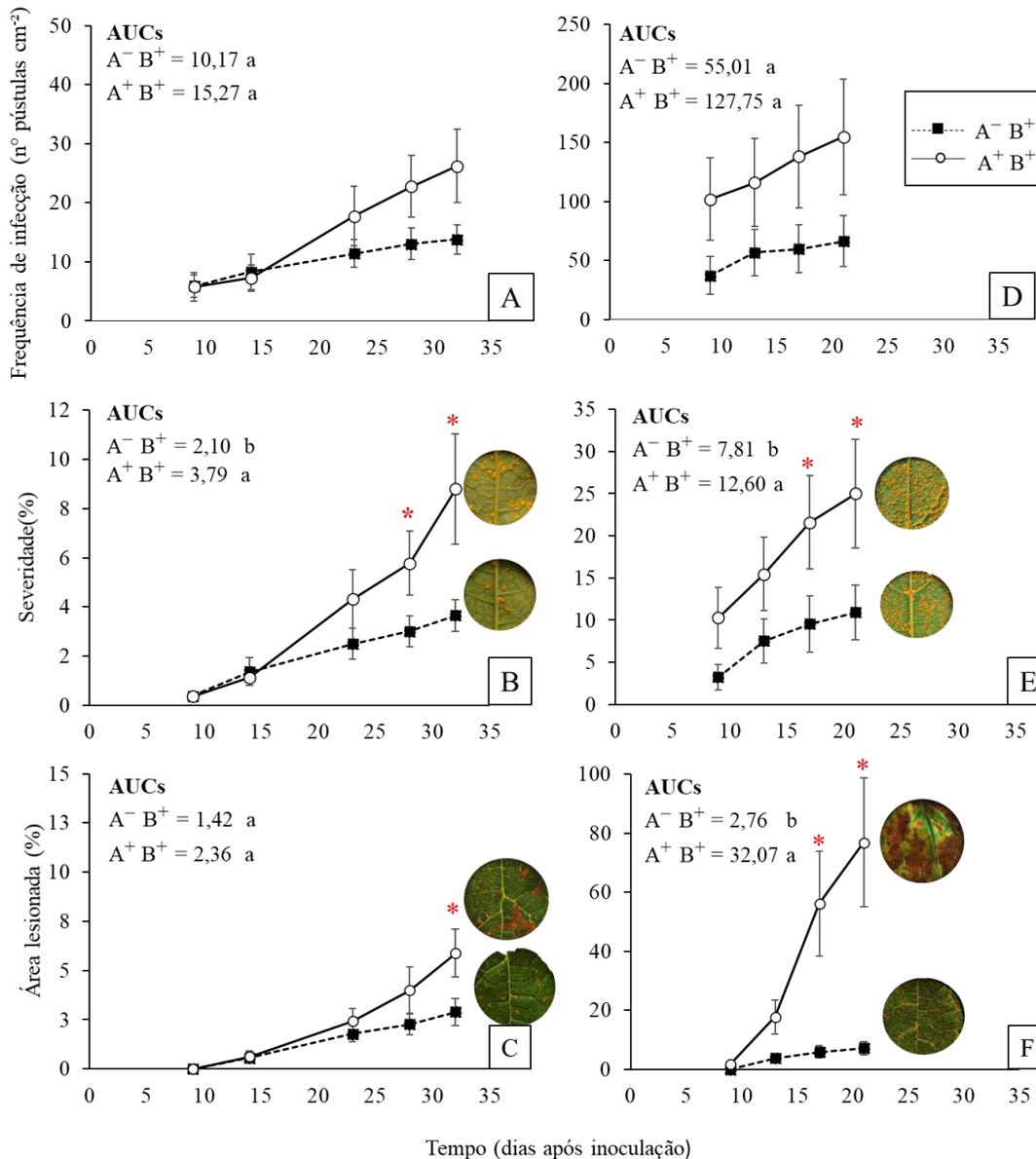
O período de latência da ferrugem nas mudas inoculadas foi de 9 dias, no experimento 1 e, 7 dias, no experimento 2, independentemente do tratamento de disponibilidade hídrica. A frequência de infecção, a severidade e a área lesionada aumentaram progressivamente após o início dos primeiros sintomas para todos os tratamentos e experimentos. No entanto, a frequência de infecção não diferiu entre os tratamentos de disponibilidade hídrica em todas as datas avaliadas ( $P > 0,05$ ). A frequência média de infecção de *N. tropicalis* nas folhas no último dia de avaliação do 1º experimento foi de 13,8 pústulas  $\text{cm}^{-2}$  no tratamento A<sup>-</sup>B<sup>+</sup> e 26,3 pústulas  $\text{cm}^{-2}$  no tratamento A<sup>+</sup>B<sup>+</sup>. No experimento 2, as frequências de infecção para os tratamentos A<sup>-</sup>B<sup>+</sup> e A<sup>+</sup>B<sup>+</sup> foram de 66,3 e 154,9 pústulas  $\text{cm}^{-2}$ , respectivamente. As áreas abaixo da curva padronizadas (AUCs) para essa variável não diferiram entre os tratamentos pelo teste-*t* a 5% de significância (Fig. 15 A e D).

A AUC padronizada dos valores de severidade foi significativamente superior ( $P < 0,05$ ) no tratamento com os estresses biótico e abiótico combinados (A<sup>+</sup>B<sup>+</sup>) (Fig. 15). As médias de severidade da ferrugem na última data de avaliação do experimento 1 em plantas submetidas

aos tratamentos  $A^-B^+$  e  $A^+B^+$  foram de 3,7 % e 8,8 %, respectivamente (Fig. 15 B). No experimento 2, as médias de severidade da ferrugem nas folhas atingiram 10,9 % e 25,0 % nos tratamentos  $A^-B^+$  e  $A^+B^+$ , respectivamente (Fig.15 E; Apêndice D).

A AUC padronizada da área lesionada causada pela ferrugem na face adaxial das folhas não diferiu entre os tratamentos no experimento 1. No experimento 2, a necrose do tipo “internerval” no tecido foliar começou a ser observada nas plantas inoculadas aos 11 DAI, unicamente no tratamento  $A^+B^+$ . Aos 17 DAI, nesse mesmo tratamento, grande parte do limbo foliar estava totalmente necrosado em razão da evolução e junção das manchas necróticas internervais (Apêndice E). Ao final da avaliação no experimento 2, 76,9% e 7,26 % da área foliar adaxial das plantas estava ocupada por lesões (necrose e/ou clorose) nos tratamentos  $A^+B^+$  e  $A^-B^+$ , respectivamente (Fig. 15 F; Apêndice D e E). No experimento 1, devido à baixa severidade da ferrugem, não ocorreu necrose internerval no tratamento  $A^+B^+$  e os pontos necróticos observados foram delimitados apenas nas áreas circundadas e correspondentes às pústulas (Apêndice F). Até o final do experimento 1 não houve desfolha das plantas, contudo, no experimento 2, foi observada desfolha de 14,8 % apenas no tratamento  $A^+B^+$ .

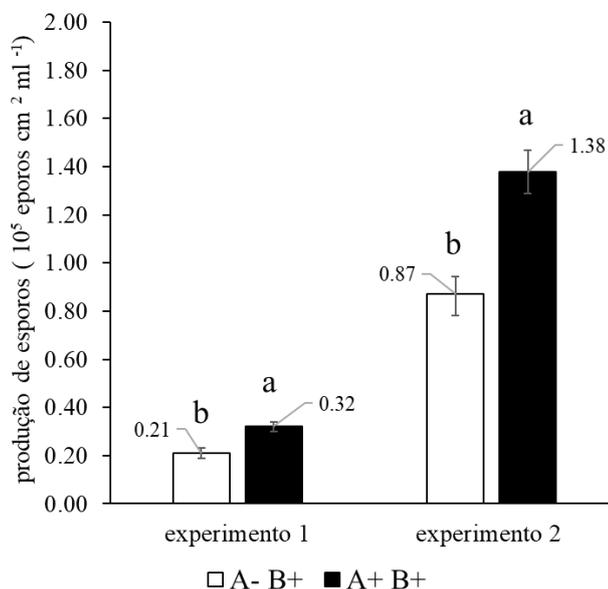
**Figura 15.** variáveis relacionadas à ferrugem da videira (frequência de infecção, severidade e área necrosada) nos experimentos 1 (A-C) e 2 (D-F), a partir de mudas de Niagara Rosada inoculadas com *Neophysopelella tropicalis* submetidas a diferentes tratamentos de disponibilidade hídrica. Asteriscos em vermelho e valores de área abaixo da curva (AUCs) seguidos de letras distintas indicam diferenças significativas entre os tratamentos pelo teste-*t*, a 5% de probabilidade.



Fonte: O autor

No experimento 1, aos 32 DAI, as médias de produção de esporos das lesões em ‘Niagara Rosada’ sem e com estresse hídrico foram de  $0,21 \times 10^5$  urediniósporos ml<sup>-1</sup> cm<sup>-2</sup> e  $0,32 \times 10^5$  urediniósporos ml<sup>-1</sup> cm<sup>-2</sup>, respectivamente. No experimento 2, aos 21 DAI, a produção média de urediniósporos no tratamento A<sup>-</sup>B<sup>+</sup> foi de  $0,87 \times 10^5$  urediniósporos ml<sup>-1</sup> cm<sup>-2</sup> e no tratamento A<sup>+</sup>B<sup>+</sup> foi de  $1,38 \times 10^5$  urediniósporos ml<sup>-1</sup> cm<sup>-2</sup> (Fig. 16).

**Figura 16.** Produção média de esporos de *Neophytophthora tropicalis* em plantas de ‘Niagara Rosada’ sem estresse hídrico ( $A^- B^+$ ) e com estresse hídrico ( $A^- B^-$ ). Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste-*t* ( $P < 0,05$ ).



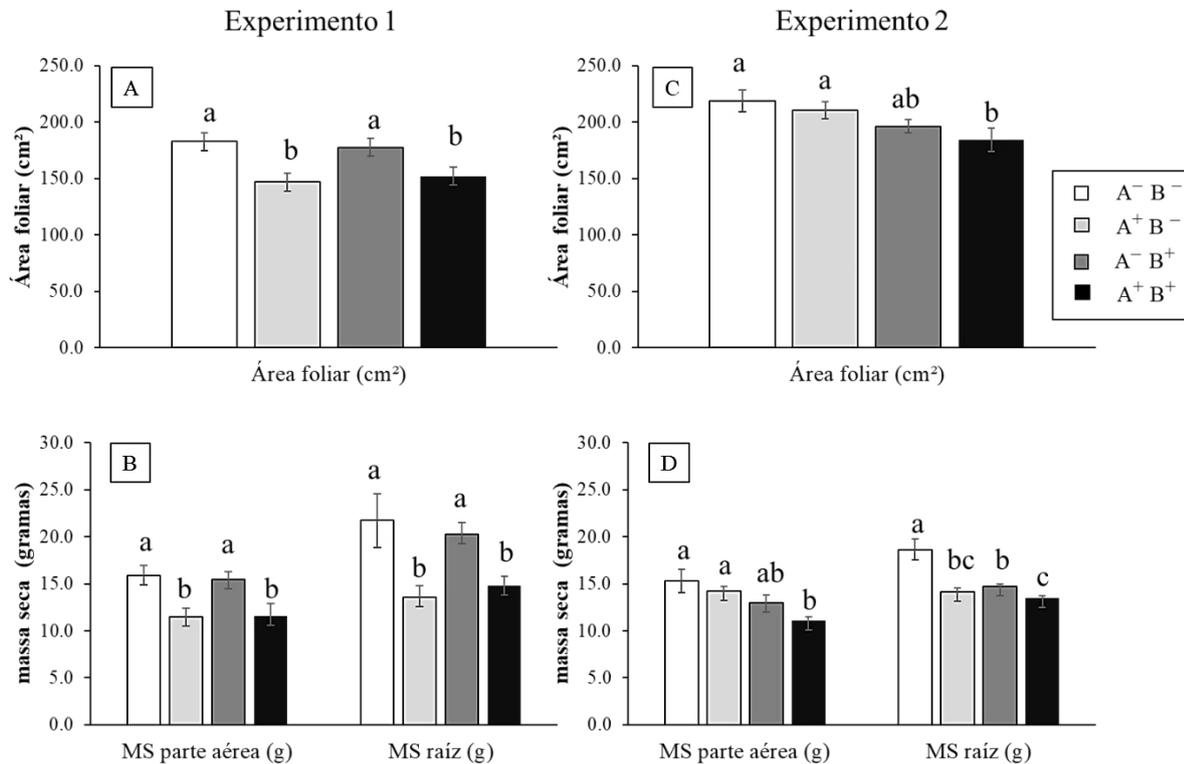
Fonte: O autor

### 3.3.3 Variáveis relacionadas ao crescimento de videira

Nos dois experimentos, os valores da área foliar (AF) foram menores nas mudas submetidas simultaneamente ao estresse biótico e abiótico ( $A^+ B^+$ ) em comparação com as mudas sem nenhum estresse ( $A^- B^-$ ). Contudo, não houve diferenças nos valores de AF entre as mudas saudáveis e inoculadas com *N. tropicalis* na ausência do estresse hídrico (Fig. 17 A e C). Foi observado um enrolamento característico nas folhas mais velhas das videiras submetidas aos tratamentos de estresse hídrico (Apêndice G).

Houve redução dos valores da massa seca (MS) da parte aérea e das raízes no tratamento  $A^+ B^+$  em relação às mudas saudáveis em todos os experimentos avaliados (Apêndice G e H). No experimento 1, tanto os valores de MS da parte aérea quanto os valores de MS da raiz não foram influenciados pela inoculação de *N. tropicalis* em plantas submetidas a 80% da CAD (Fig. 17 B). Já no experimento 2, em função da alta severidade da ferrugem, houve redução significativa na MS da raiz das plantas inoculadas ( $A^- B^+$  e  $A^+ B^+$ ) em relação às saudáveis ( $A^- B^-$  e  $A^+ B^-$ ) (Fig. 17 D; Apêndice H). No experimento 2, os valores médios de MS nas raízes das plantas foram de 18,6 g no tratamento  $A^- B^-$ , 14,2 g no tratamento  $A^+ B^-$ , 14,73 g no tratamento  $A^- B^+$  e 13,5g no tratamento  $A^+ B^+$ .

**Figura 17.** Valores médios de área foliar (AF) e massa seca (MS) de mudas de ‘Niagara Rosada’ submetidas a diferentes tratamentos: sem estresse ( $A^-B^-$ ), estresse abiótico ( $A^+B^-$ ), estresse biótico pela ferrugem ( $A^-B^+$ ) e estresses abiótico e biótico simultâneos ( $A^+B^+$ ). Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Kruskal-Wallis ( $X^2 > 0,05$ ).



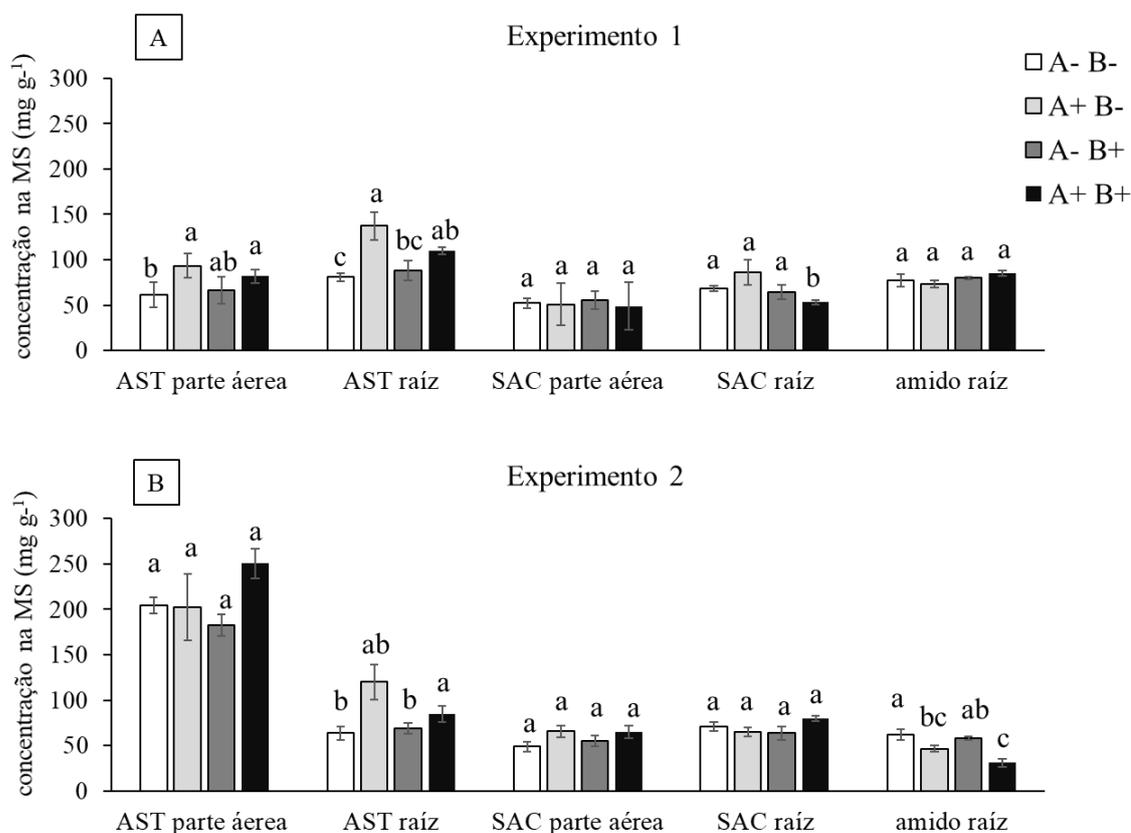
Fonte: O autor

Diferenças significativas foram observadas ( $X^2 < 0,05$ ) entre os tratamentos no acúmulo de açúcares solúveis totais (AST) das raízes nos experimentos 1 e 2 (Fig. 18). No experimento 1, os valores de AST nas raízes variaram entre  $41,6 \text{ mg g}^{-1}$  a  $97,4 \text{ mg g}^{-1}$  enquanto na parte aérea os valores de AST estavam no intervalo entre  $69,34 \text{ mg g}^{-1}$  e  $259,4 \text{ mg g}^{-1}$ . No experimento 2, foram observadas concentrações de AST variando de  $32,8 \text{ mg g}^{-1}$  a  $111,9 \text{ mg g}^{-1}$  nas raízes e de  $111,38 \text{ mg g}^{-1}$  a  $297,24 \text{ mg g}^{-1}$  na parte aérea.

Nos dois experimentos, os teores de sacarose (SAC) na parte aérea não diferiram entre os tratamentos ( $X^2 > 0,05$ ). Na raiz, apenas no experimento 1 foi possível observar a redução dos valores de SAC nas plantas submetidas aos estresses simultâneos ( $A^+B^+$ ) em comparação com os demais tratamentos (Fig. 18 A).

No experimento 1, as concentrações de amido na raiz não foram alteradas com a imposição, individual ou simultânea, do estresse hídrico e estresse pelo patógeno *N. tropicalis* (Fig. 18 A). Contudo, no experimento 2, houve diferença significativa nos teores de amido entre os tratamentos ( $X^2 > 0,05$ ) e os menores valores foram observados no tratamento  $A^+B^+$  (Fig. 18 B).

**Figura 18.** Concentração de açúcares solúveis totais (AST), sacarose (SAC) e amido da parte aérea e das raízes de mudas de ‘Niagara Rosada’ submetidas a diferentes tratamentos: sem estresse ( $A^- B^-$ ), estresse abiótico ( $A^+ B^-$ ), estresse biótico pela ferrugem ( $A^- B^+$ ) e estresses abiótico e biótico simultâneos ( $A^+ B^+$ ). Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Kruskal-Wallis ( $X^2 > 0,05$ ).



Fonte: O autor

### 3.4 Discussão

Neste presente estudo, foram investigadas as respostas fisiológicas e do crescimento de plantas de ‘Niagara Rosada’ quando submetidas simultaneamente ao estresse abiótico, por falta de água, e ao estresse biótico, pela infecção por *N. tropicallis*.

A primeira resposta fisiológica das plantas ao déficit hídrico é o fechamento estomático para evitar a transpiração perda de água (MANSFIELD; ATKINSON, 1990; CHAVES et al., 2010). De fato, com o início do estresse hídrico (0 DAI) foi possível observar a redução na condutância estomática e na transpiração das mudas nessas condições. A redução da  $g_s$  com o aumento do déficit hídrico já foi observada também em diversos estudos conduzidos com videiras (BOTA et al., 2016; MEGGIO et al., 2014; WEILER et al., 2019). No entanto, há uma complexa interação de fatores extrínsecos e intrínsecos ligados ao fechamento estomático. Por exemplo, o fechamento estomático pode estar ligado a baixa umidade atmosférica, altas temperaturas, regulação de solutos osmóticos nas células-guarda e

sinalizadores químicos, como o ácido abscísico (ABA) (BHATTACHARJEE; SAHA, 2014; MAROCO et al. 1997). Em geral, as plantas inoculadas com *Neophysopepla tropicalis*, na ausência do estresse hídrico, apresentaram valores de *g<sub>s</sub>* semelhantes aos das plantas saudáveis, indicando que o patógeno teve pouca influência nesse parâmetro. Esses resultados são semelhantes aos encontrados por Bassanezi et al. (2002) e Nogueira et al. (2017) em que o fechamento estomático das folhas de feijoeiro (*Phaseolus vulgaris*) e videira não foi interferido pela infecção causada por *Uromyces appendiculatus* e *N. tropicalis*.

Diversos estudos já relataram que os patógenos foliares podem afetar as taxas de transpiração, afetando, portanto, as relações hídricas dos tecidos vegetais (e.g. GRIMMER et al., 2012; MAYEK-PEREZ et al., 2002; NIEDERLEITNER; KNOPPIK, 1997; PINKARD; MOHAMMED, 2006; SHTIENBERG, 1992; ZHAO et al., 2011). A exposição simultânea do estresse hídrico e o patógeno *Macrophomina phaseolina* provocou o aumento da taxa de transpiração em plantas de feijoeiro em relação às plantas submetidas apenas ao estresse hídrico (MAYEK-PEREZ et al., 2002). Em nosso estudo, o fechamento estomático causou redução nos valores de *E* e isso foi claramente evidenciado nos tratamentos de estresse hídrico, mas não no tratamento com o estresse biótico individual causado por *N. tropicalis*. Mesmo em alta severidade de ferrugem, não foi observado um aumento na transpiração em plantas doentes sem limitação hídrica. Em contraste, para outras ferrugens, como *Uromyces viciae-fabae*, *Puccinia sorghi* e *Puccinia recondita* f. sp. *tritici*, a ruptura da epiderme devido à emergência de pústulas desses patógenos ocasionou o aumento nas taxas de transpiração das plantas (SHTIENBERG, 1992; TISSERA; AYRES, 1986).

As taxas fotossintéticas das plantas de ‘Niagara Rosada’ foram afetadas tanto pela infecção de *N. tropicalis* quanto pelo estresse hídrico. Contudo, o maior efeito na assimilação líquida de CO<sub>2</sub> foi observado nas plantas submetidas aos estresses combinados, principalmente em altas severidades ferrugem (condições do experimento 2). Neste tratamento, a assimilação líquida de CO<sub>2</sub> (valores de *A*) foi reduzida em até sete vezes em relação as plantas saudáveis sem estresse hídrico. As reduções na fotossíntese de videiras infectadas por *Neophysopepla tropicalis* já foi constatada anteriormente até mesmo em baixas severidades da doença. Isso por que *N. tropicalis* é capaz de reduzir a fotossíntese nas áreas de tecido verde adjacente às lesões (NAVARRO et al., 2019; NOGUEIRA JÚNIOR, et al., 2017). A inibição da fotossíntese durante a falta de água também pode ser causada pelo fechamento dos estômatos, que impede a difusão de CO<sub>2</sub> para o mesófilo foliar, resultando na diminuição da concentração intercelular de CO<sub>2</sub> (CHAVES et al., 2003). O fechamento estomático foi uma das causas, mas não a única, que levou a redução dos valores de *A* no tratamento com os estresses simultâneos (A<sup>+</sup> B<sup>+</sup>). A

principal razão para a redução dos valores de  $A$  foi devido à redução significativa da área verde ocasionada pelas áreas necrosadas e, da consequente redução da interceptação de luz.

Ao final do segundo experimento, foi observado um aumento dos valores de concentração intercelular de  $\text{CO}_2$  ( $C_i$ ) nas plantas submetidas ao estresse biótico e abiótico combinados ( $A^+ B^+$ ). No entanto, esse aumento não foi observado no experimento 1, provavelmente devido à baixa severidade da doença. O aumento da  $C_i$  em plantas doentes é uma indicação de que a redução na fotossíntese causada por patógenos não é mediada apenas por limitações estomáticas (CARRETERO et al., 2011). O aumento do  $C_i$  no experimento 2 é decorrente, possivelmente, dos danos diretos causados nos aparatos fotossintéticos (e.g. destruição dos cloroplastos) em função da intensa necrose do tecido foliar das plantas submetidas ao tratamento  $A^+ B^+$ . O aumento nos valores de  $C_i$  também foi observado em plantas de trigo e de feijoeiro infectadas com *Puccinia triticina* (CARRETERO et al., 2011) e com *Uromyces appendiculatus* (BASSANEZI et al., 2001).

Na maioria dos estudos que investigam a influência da deficiência de água no crescimento das plantas observou-se que a área foliar e a massa seca diminuíram em resposta à limitação da água (MAYEK-PÉREZ et al., 2002; NONAMI, 1998; PARK, 2001; TOUMI et al., 2007; WEILER et al., 2019). Os patógenos também são capazes de afetar o acúmulo de biomassa e o crescimento de plantas na presença ou ausência do estresse hídrico (BANCAL et al. 2012; NOGUEIRA JÚNIOR et al. 2017; PRASCH; SONNEWALD, 2013; RIBEIRO; SPÓSITO, 2022). Plantas de grão-de-bico envasadas e mantidas sob 35% da capacidade de campo combinada com a infecção por *Fusarium solani* ou por *Rhizoctonia bataticola* tiveram encurtamento da raiz primária, redução do número de raízes laterais e maiores lesões necróticas em comparação com as plantas sob tratamento apenas com um dos patógenos individualmente (SINHA et al., 2019). Em nosso estudo, observamos uma diminuição da biomassa da raiz tanto no tratamento com estresse hídrico individual ( $A^+ B^-$ ) quanto no tratamento com os estresses combinados ( $A^+ B^+$ ). A redução da MS das raízes decorrente exclusivamente da infecção por *N. tropicalis* foi observada apenas no experimento 2, ou seja, em altas severidades da doença. Foi possível observar também que, em geral, as raízes foram visivelmente mais profundas em plantas submetidas unicamente ao estresse hídrico comparado com a profundidade das raízes de plantas submetidas aos demais tratamentos. O aumento no comprimento e diâmetro da raiz pode estar associado com o traço de tolerância à seca em lavouras conforme a raiz cresce profundamente no solo para adquirir água (LYNCH et al., 2014; VILE et al., 2012; ZHAN et al., 2015) e da mesma forma, a diminuição desses parâmetros indica susceptibilidade à seca (PANG et al., 2017).

Neste estudo, a área foliar e a MS da parte aérea também foram reduzidas nas plantas submetidas aos estresses combinados. A exposição simultânea das plantas de framboeseira (*Rubus ideaus*) à seca e à ferrugem (*Thekopsora americana*) resultou também em maior redução na altura do caule e massa seca da parte aérea em comparação com as plantas não estressadas (RIBEIRO; SPÓSITO, 2022). Em nosso estudo, tanto da biomassa das raízes como a da parte aérea foi reduzida em decorrência da menor assimilação líquida de CO<sub>2</sub> e, provavelmente, pelo desbalanço dos padrões de partição e translocação de fotoassimilados.

Os efeitos de patógenos biotróficos na regulação de carboidratos em folhas infectadas é complexo e depende do tipo de interação planta-patógeno, da suscetibilidade do hospedeiro e do estágio de desenvolvimento da doença (HEISTERÜBER et al., 1994; MANDAL et al., 2009; WRIGHT et al., 1995). Em folhas de cevada infectada com *Erysiphe graminis*, a quantidade de carboidratos solúveis, como sacarose, frutose e glicose, aumentou após a infecção e permaneceu em altas concentrações durante todo processo de infecção em relação as folhas saudáveis (WRIGHT et al., 1995). Em folhas de trigo infectadas por *Puccinia graminis* f. sp. *tritici*, embora o aumento da glicose e frutose também tenha sido observado, a quantidade de sacarose, por outro lado, diminuiu, na medida que a doença se desenvolvia (HEISTERÜBER et al., 1994). Em nosso estudo, os teores de sacarose nas folhas foram mais estáveis e não foram alterados em função dos tratamentos impostos. Adicionalmente, os teores de açúcares solúveis nas folhas também não foram alterados em decorrência ao desenvolvimento de *N. tropicalis* em videira. Já em plantas de *Plantago ovata*, a infecção causada pelo míldio (*Peronospora plantaginis*) causou uma redução no teor de açúcares solúveis acompanhado por um aumento no teor de amido na folha (MANDAL et al., 2009).

Neste estudo, o estresse individual causado pela infecção por *N. tropicalis* não alterou as concentrações de açúcares solúveis, sacarose e amido nas raízes. Em contrapartida, Nogueira Júnior et al. (2017) relataram reduções nos teores desses carboidratos nas raízes de videira infectadas por *N. tropicalis* (NOGUEIRA JÚNIOR, et al., 2017). As variações dos teores de amido e açúcares na raiz, comparando com as mudas sem nenhum estresse, foram exclusivamente devido à imposição do estresse hídrico. Foi observado o aumento dos teores de glicose e redução nos teores de amido tanto nas plantas com estresse hídrico individual, quanto nas plantas com os estresses simultâneos. Isso dá indícios de que o estresse hídrico afeta significativamente a dinâmica da produção e acúmulo de carboidratos, independentemente da infecção simultânea por *N. tropicalis*. As raízes de videira importam parte dos fotoassimilados produzidos nas folhas para reestabelecer suas reservas de carboidratos que darão suporte ao início das brotações do próximo ciclo (KELLER, 2010). Como as plantas de videira utilizam o

amido como principal fonte de armazenamento nas raízes, a ocorrência do estresse hídrico juntamente com a ferrugem poderá causar a redução do vigor das plantas nas safras consecutivas de ‘Niagara Rosada’.

Em certas situações, as plantas priorizam suas respostas de defesa para a ameaça mais severa, ou seja, o estresse que é mais prejudicial e requer ação imediata. Isto resulta na supressão das respostas ao estresse que é menos severo (PRASCH; SONNEWALD, 2013; RASMUSSEN et al. 2013). Observamos nesse estudo que o estresse hídrico por si só foi mais prejudicial na fisiologia e crescimento de plantas do que o impacto causado pela ferrugem de forma isolada. Porém, quando há ocorrência simultânea desses estresses, os efeitos resultantes no desenvolvimento da doença, nas trocas gasosas, e no crescimento de plantas foi potencializado negativamente. De fato, foi observado um aumento significativo da severidade da ferrugem em videiras com a imposição do estresse hídrico, a partir de 20 dias após a inoculação e consequente aumento na esporulação.

Estudos recentes indicaram que a combinação de seca e patógeno podem também provocar respostas únicas nas plantas, que não são vistas quando cada estresse é imposto individualmente (CHOI et al. 2013; PRASCH; SONNEWALD, 2013). Um fato interessante observado neste estudo é a ocorrência da intensa necrose internerval do tecido foliar que foi somente observada nas plantas com os estresses biótico e abiótico simultâneos. As plantas apenas sob limitação hídrica não apresentaram áreas necrosadas enquanto que as plantas apenas com o estresse biótico, causada pela presença do patógeno, apresentaram apenas lesões pontuais nas áreas correspondentes ou próximas as pústulas. As causas da necrose internerval de plantas submetidas aos estresses simultâneos podem estar relacionadas à diversos fatores que necessitam ser investigados e compreendidos a nível fisiológico, bioquímico e molecular. Por exemplo, a expressão de vários genes envolvidos na resposta aos estresses podem regular a transdução de sinal mediados por hormônios e o metabolismo de micronutrientes, que, por sua vez, podem causar um aumento do estresse oxidativo associado à produção e acúmulo de espécies reativas de oxigênio (ROS), aumento das atividades de enzimas antioxidantes, menor integridade e permeabilidade das membranas, bem como a redução nos pigmentos fotossintéticos (AFTAB; HAKEEM, 2020; JAIN et al., 2010; PRASCH; SONNEWALD, 2013).

O estresse hídrico, individualmente ou simultaneamente com a infecção por *N. tropicalis*, afetou as trocas gasosas, o acúmulo de biomassa e o metabolismo de carboidratos em plantas de ‘Niagara Rosada’. Os sintomas de ferrugem foram mais severos nas plantas expostas ao estresse hídrico, provavelmente por que os mecanismos de defesa das plantas foram

comprometidos. Esses resultados indicam que o estresse hídrico pode ser um importante fator predisponente à ferrugem da videira. Essas informações podem ser usadas, em modelos de simulação, para obter uma melhor compreensão do comportamento da ferrugem em cenários futuros de mudanças climáticas e para desenvolver estratégias para superar o estresse combinado em áreas afetadas pela seca.

## Referências

- ACHUO, E. A.; PRINSEN, E.; HÖFTE, M. Influence of drought, salt stress and abscisic acid on the resistance of tomato to *Botrytis cinerea* and *Oidium neolycopersici*. **Plant pathology**, v. 55, n. 2, p. 178-186, 2006.
- AFTAB, T.; HAKEEM, K. R. **Plant micronutrients: deficiency and toxicity management**. Springer Nature, 470 p. 2020.
- ALBUQUERQUE, P. E. P. Estratégias de manejo de irrigação: exemplos de cálculo. Embrapa Milho e Sorgo, 2010.
- ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS. Official methods of analysis. 16th ed. Washington, DC, 1995. 1018p
- ATKINSON, N. J.; URWIN, P. E. The interaction of plant biotic and abiotic stresses: from genes to the field. **Journal of experimental botany**, v. 63, n. 10, p. 3523-3543, 2012.
- AYRES, P. G. Effect of water potential of pea leaves on spore production by *Erysiphe pisi* (powdery mildew). Transactions of the British **Mycological Society**, v. 68, n. 1, p. 97-100, 1977.
- BANCAL, M. O.; HANSART, A.; SACHE, I.; & BANCAL, P. Modelling fungal sink competitiveness with grains for assimilates in wheat infected by a biotrophic pathogen. **Annals of Botany**, v. 110, n. 1, p. 113-123, 2012.
- BASSANEZI, R. B.; AMORIM, L.; FILHO, A. B.; HAU, B.; & BERGER, R. D. Accounting for photosynthetic efficiency of bean leaves with rust, angular leaf spot and anthracnose to assess crop damage. **Plant Pathology**, v. 50, n. 4, p. 443-452, 2001.
- BASSANEZI, R. B.; AMORIM, L.; FILHO, A. B.; & BERGER, R. D. Gas exchange and emission of chlorophyll fluorescence during the monocycle of rust, angular leaf spot and anthracnose on bean leaves as a function of their trophic characteristics. **Journal of Phytopathology**, v. 150, n. 1, p. 37-47, 2002.
- BETHENOD, O.; HUBER, L.; SLIMI, H. Photosynthetic response of wheat to stress induced by *Puccinia recondita* and post-infection drought. **Photosynthetica**, v. 39, n. 4, p. 581-590, 2001.
- BHATTACHARJEE, S.; SAHA, A. K. **Plant water-stress response mechanisms**. In: Approaches to Plant Stress and their Management. Springer, New Delhi, p. 149-172, 2014.
- BIELESKI, R. L.; TURNER, N. A. Separation and estimation of amino acids in crude plant extracts by thin-layer electrophoresis and chromatography. **Analytical biochemistry**, v. 17, n. 2, p. 278-293, 1966.

- BOTA, J., TOMÁS, M.; FLEXAS, J.; MEDRANO, H.; & ESCALONA, J. M. Differences among grapevine cultivars in their stomatal behavior and water use efficiency under progressive water stress. **Agricultural Water Management**, v. 164, p. 91-99, 2016.
- CARRETERO, R.; BANCAL, M. O.; MIRALLES, D. J. Effect of leaf rust (*Puccinia triticina*) on photosynthesis and related processes of leaves in wheat crops grown at two contrasting sites and with different nitrogen levels. **European Journal of Agronomy**, v. 35, n. 4, p. 237-246, 2011.
- CASAROLI, D.; JONG VAN LIER, Q. Critérios para determinação da capacidade de vaso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 1, p. 59-66, 2008.
- CHACÓN-VOZMEDIANO, J. L.; MARTÍNEZ-GASCUEÑA, J.; GARCÍA-NAVARRO, F. J.; & JIMÉNEZ-BALLESTA, R. Effects of Water Stress on Vegetative Growth and 'Merlot' Grapevine Yield in a Semi-Arid Mediterranean Climate. **Horticulturae**, v. 6, n. 4, p. 95, 2020.
- CHAKRABORTY, S.; NEWTON, A. C. Climate change, plant diseases and food security: an overview. *Plant pathology*, v. 60, n. 1, p. 2-14, 2011.
- CHAVES, M. M.; MAROCO, J. P.; PEREIRA, J. S. Understanding plant responses to drought—from genes to the whole plant. **Functional plant biology**, v. 30, n. 3, p. 239-264, 2003.
- CHAVES, M. M.; ZARROUK, O.; FRANCISCO, R.; COSTA, J. M.; SANTOS, T.; REGALADO, A. P., ... & LOPES, C. M. Grapevine under deficit irrigation: hints from physiological and molecular data. *Annals of botany*, v. 105, n. 5, p. 661-676, 2010.
- CHOI, H. K.; IANDOLINO, A.; DA SILVA, F. G.; & COOK, D. R. Water deficit modulates the response of *Vitis vinifera* to the Pierce's disease pathogen *Xylella fastidiosa*. **Molecular Plant-Microbe Interactions**, v. 26, n. 6, p. 643-657, 2013.
- COAKLEY, S. M.; SCHERM, H. Plant disease in a changing global environment. *Aspects of Applied Biology*, v.45, p. 227-238, 1996.
- DESPREZ-LOUSTAU, M. L.; MARÇAIS, B.; NAGELEISEN, L. M.; PIOUS, D.; & VANNINI, A. Interactive effects of drought and pathogens in forest trees. **Annals of forest science**, v. 63, n. 6, p. 597-612, 2006.
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. Yield response to water. **Irrigation and drainage paper**, v. 33, p. 257, 1979.
- DUBOIS, M.; GILLES, K. A.; HAMILTON, J. K.; REBERS, P. T.; & SMITH, F. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. **Analytical chemistry**, v. 28, n. 3, p. 350-356, 1956.
- ELAD, Y. PERTOT, I. Climate change impacts on plant pathogens and plant diseases. **Journal of Crop Improvement**, v. 28, n. 1, p. 99-139, 2014.
- FAROOQ, M.; WAHID, A.; KOBAYASHI, N. S. M. A.; FUJITA, D. B. S. M. A.; & BASRA, S. M. A. Drought stress: effects, mechanisms and management. In: **Sustainable agriculture**. Springer, Dordrecht, 2009. p. 153-188.
- FLEXAS, J.; BOTA, J.; ESCALONA, J. M.; SAMPOL, B.; & MEDRANO, H. Effects of drought on photosynthesis in grapevines under field conditions: an evaluation of stomatal and mesophyll limitations. **Functional Plant Biology**, v. 29, n. 4, p. 461-471, 2002.

- FRIZZONE, J. A. **Necessidade de água para irrigação**. ESALQ/USP, Departamento de Engenharia, 2017.
- GHINI, R. Mudanças climáticas globais e doenças de plantas. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2005.
- GRIMMER, M. K.; JOHN FOULKES, M.; PAVELEY, N. D. Foliar pathogenesis and plant water relations: a review. **Journal of experimental botany**, v. 63, n. 12, p. 4321-4331, 2012.
- HEISTERÜBER, D.; SCHULTE, P.; MOERSCHBACHER, B. M. Soluble carbohydrates and invertase activity in stem rust-infected, resistant and susceptible near-isogenic wheat leaves. **Physiological and molecular plant pathology**, v. 45, n. 2, p. 111-123, 1994.
- HOSSAIN, M.; VENEKLAAS, E. J.; HARDY, G. E. S. J.; & POOT, P. Tree host-pathogen interactions as influenced by drought timing: linking physiological performance, biochemical defence and disease severity. **Tree Physiology**, v. 39, n. 1, p. 6-18, 2019.
- IPCC. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; Cambridge, 2014.
- IRULAPPAN, V.; SENTHIL-KUMAR, M. Morpho-physiological traits and molecular intricacies associated with tolerance to combined drought and pathogen stress in plants. In: **Biotechnologies of Crop Improvement**, Volume 3. Springer, Cham, 2018. p. 59-74.
- JAIN, R., SRIVASTAVA, S.; SOLOMON, S.; SHRIVASTAVA, A. K.; & CHANDRA, A. Impact of excess zinc on growth parameters, cell division, nutrient accumulation, photosynthetic pigments and oxidative stress of sugarcane (*Saccharum* spp.). **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 32, n. 5, p. 979-986, 2010.
- JONES, H. **Plant and macrolimate: a quantitative approach to environmental plant physiology**. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1992. 428 p.
- KELLER, M. **The Science of Grapevines - Anatomy and Physiology**. Washington, USA: Elsevier, 2010.
- KISSOUDIS, C.; VAN DE WIEL, C.; VISSER, R. G.; & VAN DER LINDEN, G. Enhancing crop resilience to combined abiotic and biotic stress through the dissection of physiological and molecular crosstalk. **Frontiers in plant science**, v. 5, p. 207, 2014.
- LYNCH, J. P.; CHIMUNGU, J. G.; BROWN, K. M. Root anatomical phenes associated with water acquisition from drying soil: targets for crop improvement. **Journal of Experimental Botany**, v. 65, n. 21, p. 6155-6166, 2014.
- LUTERBACHER, J.; XOPLAKI, E.; CASTY, C.; WANNER, H.; PAULING, A.; KÜTTEL, M.; ... & LADURIE, E. L. R. Mediterranean climate variability over the last centuries: a review. **Developments in Earth and environmental Sciences**, v. 4, p. 27-148, 2006.
- MA, Z.; MORGAN, D. P.; MICHAILIDES, T. J. Effects of water stress on Botryosphaeria blight of pistachio caused by *Botryosphaeria dothidea*. **Plant Disease**, v. 85, n. 7, p. 745-749, 2001.
- MANSFIELD T.J., ATKINSON C.J. Stomatal behaviour in water stressed plants, in: Alscher R.G., Cumming J.R. (Eds.), Stress Responses in Plants: Adaptation and Acclimation Mechanisms, Wiley-Liss, New York, pp. 241-264, 1990. **Physiological and Molecular Plant Pathology**, v. 60, n. 4, p. 185-195, 2002.

- MANDAL, K.; SARAVANAN, R.; MAITI, S., & KOTHARI, I. L. Effect of downy mildew disease on photosynthesis and chlorophyll fluorescence in *Plantago ovata* Forsk. **Journal of Plant Diseases and Protection**, v. 116, n. 4, p. 164-168, 2009.
- MAROCO, J. P.; PEREIRA, J. S.; CHAVES, M. Manuela. Stomatal responses to leaf-to-air vapour pressure deficit in Sahelian species. **Functional Plant Biology**, v. 24, n. 3, p. 381-387, 1997.
- MAYEK-PÉREZ, N., GARCÍA-ESPINOSA, R., LÓPEZ-CASTAÑEDA, C., ACOSTA-GALLEGOS, J. A., & SIMPSON, J. Water relations, histopathology and growth of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) during pathogenesis of *Macrophomina phaseolina* under drought stress. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, v. 60, n. 4, p. 185-195, 2002.
- MCELRONE, A. J., SHERALD, J. L., FORSETH, I. N. Interactive effects of water stress and xylem-limited bacterial infection on the water relations of a host vine. **Journal of Experimental Botany**, v. 54, n. 381, p. 419-430, 2003.
- MEGGIO, F., PRINSI, B., NEGRI, A. S., SIMONE DI LORENZO, G., LUCCHINI, G., PITACCO, A., ... & ESPEN, L. Biochemical and physiological responses of two grapevine rootstock genotypes to drought and salt treatments. **Australian Journal of Grape and Wine Research**, v. 20, n. 2, p. 310-323, 2014.
- NONAMI, H. Plant water relations and control of cell elongation at low water potentials. **Journal of Plant Research**, v. 111, n. 3, p. 373-382, 1998.
- NAVARRO, B. L.; NOGUEIRA JÚNIOR, A. F.; RIBEIRO, R. V.; & SPÓSITO, M. B. Photosynthetic damage caused by grapevine rust (*Phakopsora euvtis*) in *Vitis vinifera* and *Vitis labrusca*. **Australasian Plant Pathology**, v. 48, n. 5, p. 509-518, 2019.
- NIEDERLEITNER, S.; KNOPPIK, D. Effects of the cherry leaf spot pathogen *Blumeriella jaapii* on gas exchange before and after expression of symptoms on cherry leaves. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, v. 51, n. 3, p. 145-153, 1997.
- NOGUEIRA JÚNIOR, A. F., RIBEIRO, R. V., APPEZZATO-DA-GLÓRIA, B., SOARES, M. K., RASERA, J. B., AND AMORIM, L. *Phakopsora euvtis* causes unusual damage to leaves and modifies carbohydrate metabolism in grapevine. **Frontiers in plant science**, v. 8, p. 1675, 2017.
- PANG, J.; TURNER, N. C.; KHAN, T.; DU, Y. L.; XIONG, J. L.; COLMER, T. D.; ... & SIDDIQUE, K. H. Response of chickpea (*Cicer arietinum* L.) to terminal drought: leaf stomatal conductance, pod abscisic acid concentration, and seed set. **Journal of Experimental Botany**, v. 68, n. 8, p. 1973-1985, 2017.
- PARK, Y. Comparative Water Relations of Two *Vitis vinifera* Cultivars, Riesling and Chardonnay. **The Korean Journal of Ecology**, v. 24, n. 4, p. 223-226, 2001.
- PAUL, N. D., AYRES, P. G. Effects of rust and post-infection drought on photosynthesis, growth and water relations in groundsel. **Plant Pathology**, v. 33, n. 4, p. 561-569, 1984.
- PINKARD, E. A.; MOHAMMED, C. L. Photosynthesis of *Eucalyptus globulus* with *Mycosphaerella* leaf disease. **New Phytologist**, v. 170, n. 1, p. 119-127, 2006.
- POTTER, N. J.; SRIKANTHAN, R. Characterization of recent rainfall and runoff in the Murray-Darling Basin: a report to the Australian government from the CSIRO Murray-Darling basin sustainable yields project. Australia: CSIRO, 2008.

- PRASCH, C. M.; SONNEWALD, U. Signaling events in plants: stress factors in combination change the picture. **Environmental and Experimental Botany**, v. 114, p. 4-14, 2015.
- PRIMIANO, I. V., LOEHRER, M., AMORIM, L., SCHAFFRATH, U. Asian grapevine leaf rust caused by *Phakopsora euvtis*: an important disease in Brazil. **Plant Pathology**, v. 66, n. 5, p. 691-701, 2017.
- R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2021. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>> .
- RAIJ, B. van. Seleção de métodos de laboratório para avaliar a disponibilidade de fósforo em solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.2, n.1, p.1-9, 1978.
- RASMUSSEN, S.; BARAH, P.; SUAREZ-RODRIGUEZ, M. C.; BRESSENDORFF, S.; FRIIS, P.; COSTANTINO, P.; BONES A. M.; NIELSEN H .B.; MUNDY, J. Transcriptome responses to combinations of stresses in Arabidopsis. **Plant physiology**, v. 161, n. 4, p. 1783-1794, 2013.
- RIBEIRO, R. R.; SPÓSITO, M. B. Interference of late rust associated with water deficit in the primary metabolism of raspberries. **European Journal of Plant Pathology**, p. 1-14, 2022.
- RAMEGOWDA, V.; SENTHIL-KUMAR, M.; ISHIGA, Y., KAUNDAL, A.; UDAYAKUMAR, M.; & MYSORE, K. Drought stress acclimation imparts tolerance to *Sclerotinia sclerotiorum* and *Pseudomonas syringae* in *Nicotiana benthamiana*. *International journal of molecular sciences*, v. 14, n. 5, p. 9497-9513, 2013
- SANTOS, R. F.; PRIMIANO, I. V.; AMORIM, L. Identification and pathogenicity of *Neophytopella* species associated with Asian grapevine leaf rust in Brazil. **Plant Pathology**, v. 70, n. 1, p. 74-86, 2021.
- SHISHKOFF, N.; BRUCKART, W. L. Water Stress and Damage Caused by *Puccinia jaceaeon* Two *Centaurea* Species. **Biological Control**, v. 6, n. 1, p. 57-63, 1996.
- SHTIENBERG, D. Effects of foliar diseases on gas exchange processes: a comparative study. **Phytopathology**, v. 82, n. 7, p. 760-765, 1992.
- SINHA, R.; IRULAPPAN, V.; MOHAN-RAJU, B.; SUGANTHI, A.; & SENTHIL-KUMAR, M. Impact of drought stress on simultaneously occurring pathogen infection in field-grown chickpea. *Scientific reports*, v. 9, n. 1, p. 1-15, 2019.
- TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; & TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro, v. 4, 2017.
- TISSERA, P.; AYRES, P. G. Transpiration and the water relations of faba bean (*Vicia faba*) infected by rust (*Uromyces viciae-fabae*). **New phytologist**, v. 102, n. 3, p. 385-395, 1986.
- TOUMI, I.; M'SEHLI, W., BOURGOU, S.; JALLOULI, N.; BENSALÉM-FNAYOU, A.; GHORBEL, A.; & MLIKI, A. Response of ungrafted and grafted grapevine cultivars and rootstocks (*Vitis* sp.) to water stress. **OENO One**, v. 41, n. 2, p. 85-94, 2007
- VAN HANDEL, E. Direct microdetermination of sucrose. **Analytical biochemistry**, v. 22, n. 2, p. 280-283, 1968.
- VILE, D.; PERVENT, M.; BELLUAU, M.; VASSEUR, F.; BRESSON, J.; MULLER, B.; ... & SIMONNEAU, T. *Arabidopsis* growth under prolonged high temperature and water

deficit: independent or interactive effects?. **Plant, cell & environment**, v. 35, n. 4, p. 702-718, 2012.

WRIGHT, D. P.; BALDWIN, B. C.; SHEPHARD, M. C.; & SCHOLLES, J. Source-sink relationships in wheat leaves infected with powdery mildew. I. Alterations in carbohydrate metabolism. **Physiological and Molecular Plant Pathology**, v. 47, n. 4, p. 237-253, 1995.

WEILER, C. S.; MERKT, N.; HARTUNG, J.; & GRAEFF-HÖNNINGER, S. Variability among Young Table Grape Cultivars in Response to Water Deficit and Water Use Efficiency. **Agronomy**, v. 9, n. 3, p. 135, 2019.

ZHAN, A.; SCHNEIDER, H.; LYNCH, J. P. Reduced lateral root branching density improves drought tolerance in maize. **Plant physiology**, v. 168, n. 4, p. 1603-1615, 2015.

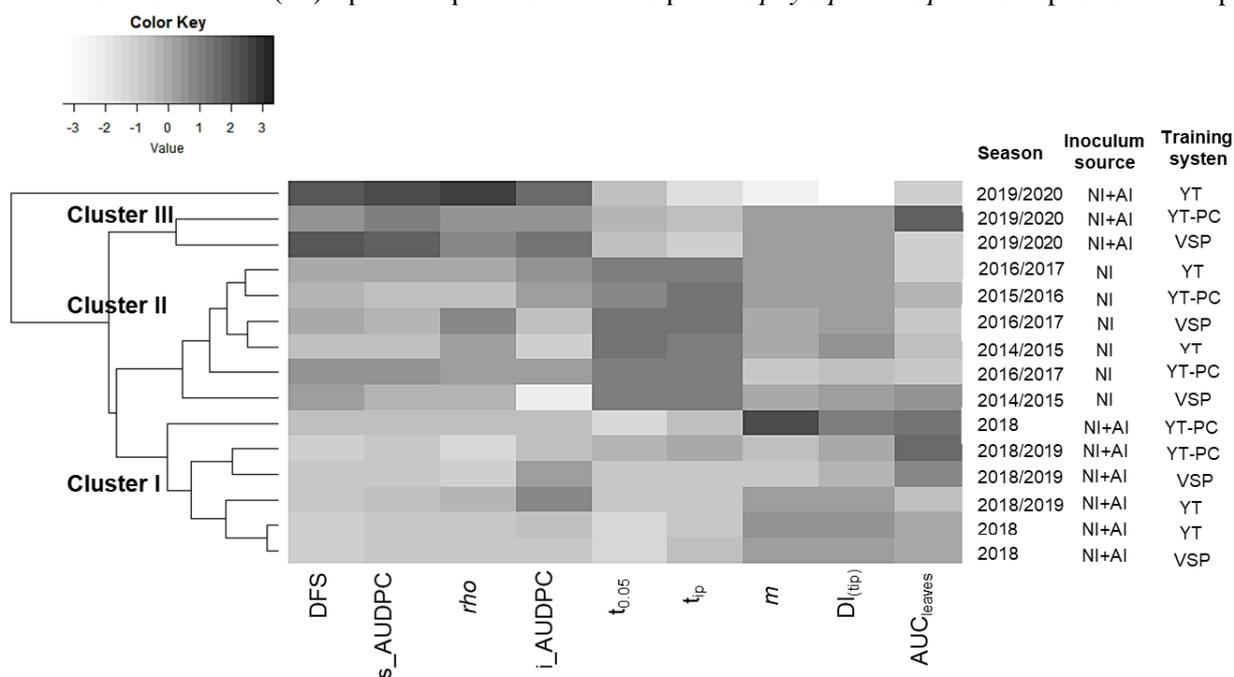
ZHANG, H.; SONNEWALD, U. Differences and commonalities of plant responses to single and combined stresses. **The Plant Journal**, v. 90, n. 5, p. 839-855, 2017.

ZHAO, D.; GLYNN, N. C.; GLAZ, B.; COMSTOCK, J. C.; & SOOD, S. Orange rust effects on leaf photosynthesis and related characters of sugarcane. **Plant Disease**, v. 95, n. 6, p. 640-647, 2011.



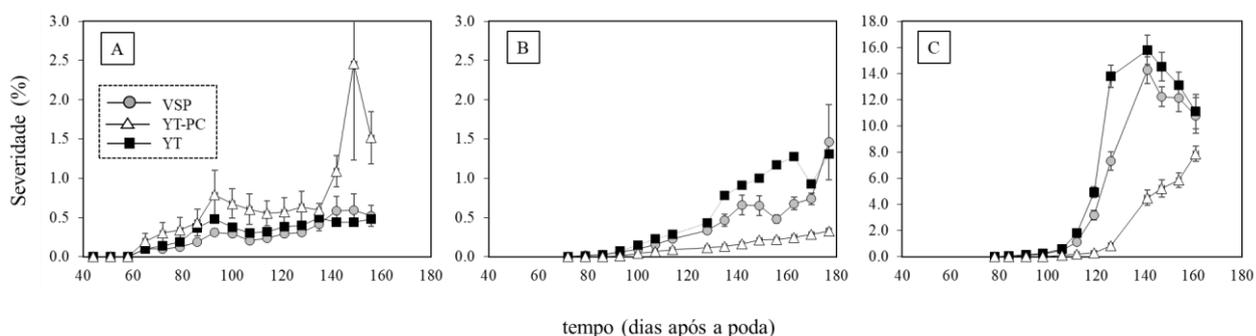
## APÊNDICES

**APÊNDICE A** – Mapa de calor de nove variáveis contínuas relacionadas às epidemias de ferrugem da videira:  $m$  = parâmetro de forma do modelo de Richards;  $\rho$  = taxa absoluta média ponderada de aumento da doença;  $DI_{tip}$  = incidência da doença no ponto de inflexão;  $t_{ip}$  = tempo em dias para atingir o ponto de inflexão;  $t_{0,05}$  = tempo em dias para sintomas iniciais;  $iAUDPC$  = área padronizada sob curva de progresso da incidência;  $sAUDPC$  = área padronizada sob curva de progresso da severidade;  $DSF$  = severidade final da doença; e  $AUC_{leaves}$  = área padronizada sob a curva de progresso das folhas remanescentes. Os experimentos foram conduzidos durante a safra 2014/2015 a 2019/2020 em três diferentes sistemas de condução: Espaldeira (VSP), Y descoberto (YT) e Y coberto associado a cobertura plástica (YT-PC). A epidemia foi impulsionada por fonte de inóculo natural (NI) e por fonte de inóculo artificial (IA) a partir de plantas infectadas por *Neophytopella tropicalis* dispostas em campo.



Fonte: O autor

**APÊNDICE B** – Progresso da severidade da ferrugem em ‘Niagara Rosada’ entre os sistemas de condução em espaldeira (VSP), Y descoberto (Y) e Y coberto (YT-PC) durante as safra outono-inverno de 2018 (A), primavera-verão 2018/2019 (B) e primavera-verão 2019/2020 (C).



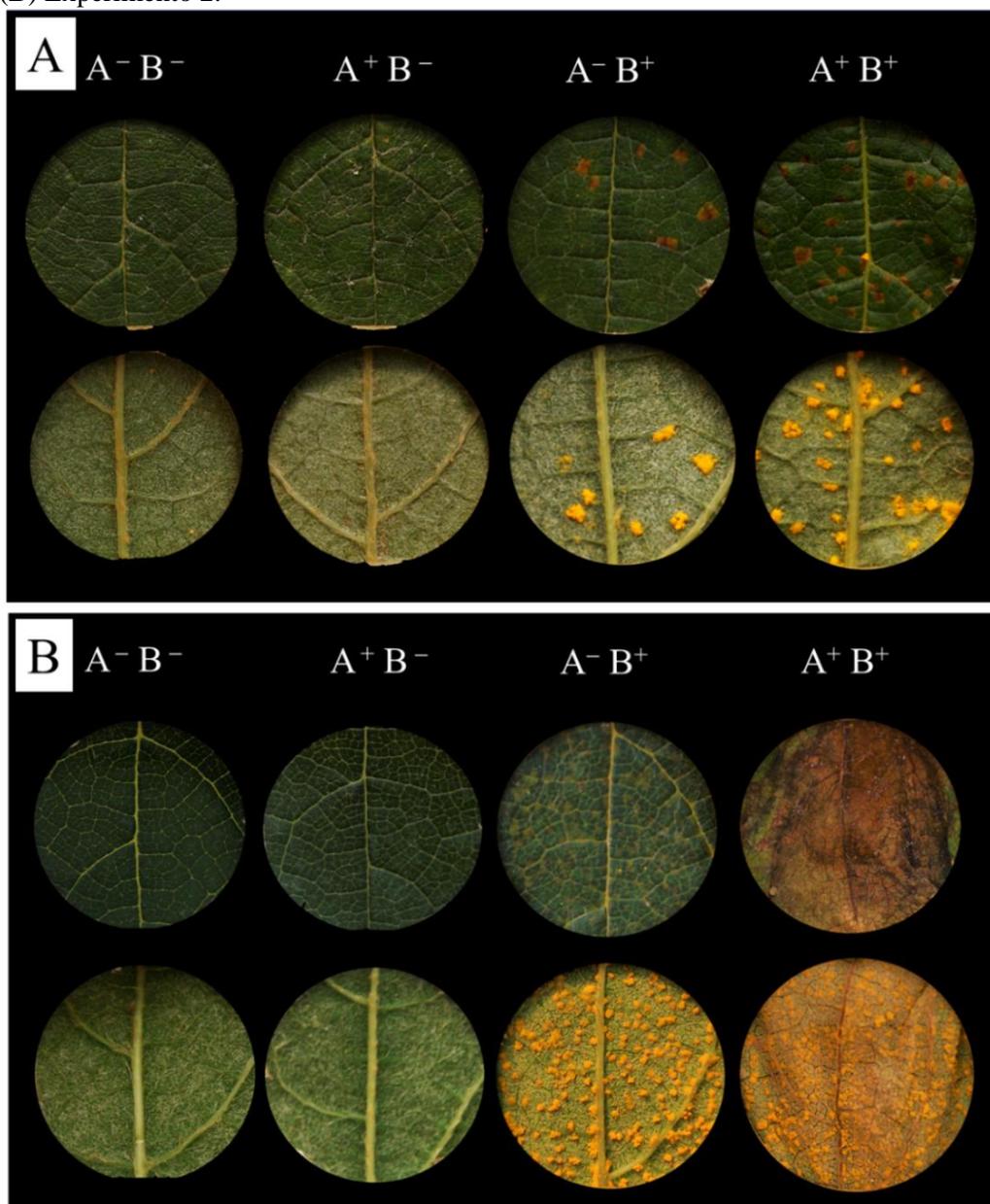
Fonte: O autor

**APÊNDICE C** – Teste preliminar para determinação do fator de disponibilidade hídrica (fator *f*). Valores médios de assimilação líquida (*A*), transpiração (*E*) e condutância estomática (*g<sub>s</sub>*) de plantas de ‘Niagara Rosada’ submetidas a diferentes níveis de disponibilidade hídrica.

<b>Tratamentos</b>	<b><i>A</i></b> ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )		<b><i>g<sub>s</sub></i></b> ( $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )		<b><i>C<sub>i</sub></i></b> ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )		<b><i>E</i></b> ( $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )	
80% CAD	13,53	a	0,191	a	271,00	a	2,71	a
40% CAD	8,31	ab	0,069	b	191,00	c	1,07	b
30% CAD	6,02	b	0,051	b	201,66	b	0,75	c

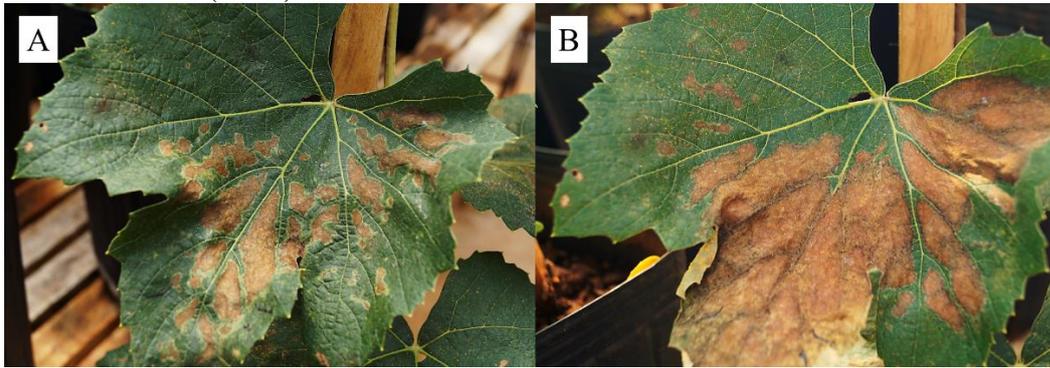
Médias seguidas da mesma letra em coluna não diferem entre si pelo teste de Kruskal-wallis a 5% de significância

**APÊNDICE D** – Área foliar coletadas de mudas de videira submetidas à diferentes tratamentos: sem estresse ( $A^- B^-$ ), estresse abiótico ( $A^+ B^-$ ), estresse biótico pela ferrugem ( $A^- B^+$ ) e estresses abiótico e biótico simultâneos ( $A^+ B^+$ ). **(A)** Experimento 1. **(B)** Experimento 2.



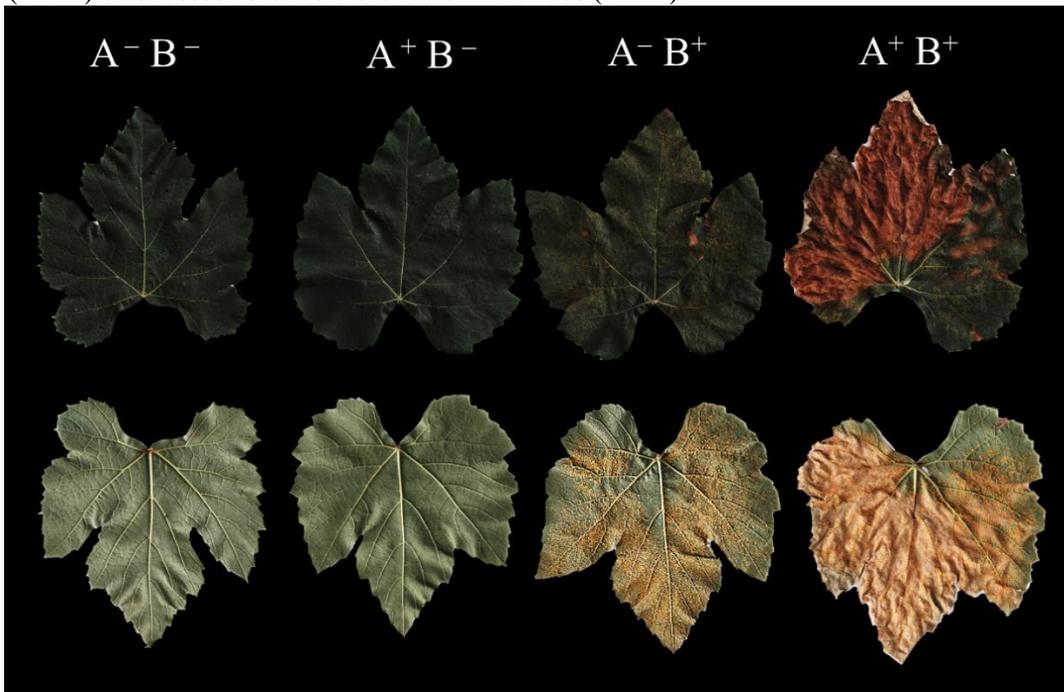
Fonte: O autor

**APÊNDICE E** – Folhas de videira coletadas aos 13 (A) e 17 (B) dias após inoculação com *Neophysopepla tropicalis* de mudas submetidas ao estresse abiótico e biótico simultaneamente ( $A^+B^+$ ).



Fonte: O autor

**APÊNDICE F** – Folhas de videira coletadas a partir de mudas submetidas à diferentes tratamentos: sem estresse ( $A^-B^-$ ), estresse abiótico ( $A^+B^-$ ), estresse biótico pela ferrugem ( $A^-B^+$ ) e estresses abiótico e biótico simultâneos ( $A^+B^+$ ).



Fonte: O autor

**APÊNDICE G** – Parte aérea das mudas de videira em diferentes tratamentos: sem estresse ( $A^- B^-$ ), estresse abiótico ( $A^+ B^-$ ), estresse biótico pela ferrugem ( $A^- B^+$ ) e estresses abiótico e biótico simultâneos ( $A^+ B^+$ ).



Fonte: O autor

**APÊNDICE H** – Sistema radicular das mudas de videira em diferentes tratamentos: sem estresse ( $A^- B^-$ ), estresse abiótico ( $A^+ B^-$ ), estresse biótico pela ferrugem ( $A^- B^+$ ) e estresses abiótico e biótico simultâneos ( $A^+ B^+$ ).



Fonte: O autor