

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS AGROVETERINÁRIAS – CAV
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRODUÇÃO VEGETAL – PPGPV

PAULO SÉRGIO GULARTE

**QUALIDADE DE MAÇÃS ‘CRIPPS PINK’ ARMAZENADAS EM ATMOSFERA
CONTROLADA COM ÓXIDO NÍTRICO**

LAGES

2023

PAULO SÉRGIO GULARTE

**QUALIDADE DE MAÇÃS 'CRIPPS PINK' ARMAZENADAS EM ATMOSFERA
CONTROLADA COM ÓXIDO NÍTRICO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal da Universidade do Estado de Santa Catarina como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Produção Vegetal, área de concentração Biologia e Tecnologia Pós-Colheita.

Orientador: Dr. Cristiano André Steffens

LAGES

2023

**Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da
Biblioteca Setorial do CAV/UDESC,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

Gularte, Paulo Sérgio

Qualidade de maçãs 'Cripps Pink' armazenadas em
atmosfera controlada com óxido nítrico /Paulo Sérgio
Gularte. -- 2023.

77 p.

Orientador: Cristiano André Steffens

Dissertação (mestrado) -- Universidade do Estado de
Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias,
Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, Lages,
2023.

1. Malus domestica Borkh. 2. etileno. 3. compostos
fermentativos. 4. estresse oxidativo. 5. perfil volátil. I.
Steffens, Cristiano André. II. Universidade do Estado de
Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias,
Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal. III.
Título.

PAULO SÉRGIO GULARTE

**QUALIDADE DE MAÇÃS 'CRIPPS PINK' ARMAZENADAS EM ATMOSFERA
CONTROLADA COM ÓXIDO NÍTRICO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal da Universidade do Estado de Santa Catarina como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Produção Vegetal, área de concentração Biologia e Tecnologia Pós-Colheita
Orientador: Dr. Cristiano André Steffens

BANCA EXAMINADORA



Cristiano André Steffens, Doutor.

Universidade do Estado de Santa Catarina

Membros:



Fabio Rodrigo Thewes, Doutor.

Universidade Federal de Santa Maria



Rogério de Oliveira Anese, Doutor.

Instituto Federal de Santa Catarina

Lages (SC), 23 de fevereiro de 2023.

A todos que foram essenciais no percorrer
dos caminhos que me trouxeram até aqui

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida, proteção, alento e sabedoria em todos os momentos;

A minha família, que esteve sempre ao meu lado, acreditando no meu potencial. Agradeço especialmente a minha mãe Marli Barth, e a minha irmã Marla Gracieli, pelos exemplos de vida e amor incondicional;

Ao meu orientador, professor Cristiano, pela disponibilidade em me receber como mestrando em sua equipe e pela excelente orientação durante o mestrado. Agradeço principalmente pela confiança, incentivo e pelos sábios conselhos compartilhados;

As professoras Aquidauana e Keli pela amizade, auxílio dos momentos difíceis e presença constante em minha trajetória acadêmica;

Aos colegas do Laboratório de Fisiologia Pós-Colheita, que foram essenciais na condução dos experimentos e na superação dos desafios no percorrer do mestrado;

Agradeço, especialmente, aos amigos que construí neste período e que foram/são minha fortaleza nos dias de angústia e aflição, sempre dispostos a oferecer um ombro amigo, uma palavra de conforto e quando necessário um puxão de orelha: Juliana Martins, Jessiane Mary, Flávia da Silva, Karina Zanol, Patricia Mara, Matheus Albuquerque, Samara Zanella, Marcell Buss, Janaiana da Silva, Marcos Martins, Laura Tirelli, Willian Coser, Vanucci Santi, Vander Oliveira, Samara Nascimento, Rhodolfo Silva, Yasmin Pincegher, Leonardo Mutzenberg, Gabriela Carolina, Leila Camintia e Lethícia Falk. Obrigado pela presença no decorrer dessa caminhada e por tornarem-se minha família em Lages.

A Universidade do Estado de Santa Catarina, ao Centro de Ciências Agroveterinárias e ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, pelo ensino de qualidade;

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Fundo de Apoio à Manutenção e ao Desenvolvimento da Educação Superior (FUMDES) pela concessão da bolsa de pós-graduação;

A empresa Schio, pela concessão dos frutos para realização deste trabalho.

“A utopia está lá no horizonte. Me aproximo dois passos, ela se afasta dois passos. Caminho dez passos e o horizonte corre dez passos. Por mais que eu caminhe, jamais alcançarei. Para que serve a utopia? Serve para isso: para que eu não deixe de caminhar”

Eduardo Galeano

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da aplicação de diferentes doses de óxido nítrico (NO), aplicado durante o armazenamento em atmosfera controlada (AC) sobre a manutenção da qualidade, na redução do estresse oxidativo e na formação de compostos voláteis de maçãs 'Cripps Pink'. Os tratamentos avaliados foram: 0, 1, 2, 5 e 10 $\mu\text{L L}^{-1}$ de NO. Os frutos foram colhidos em dois pontos de colheita distintos (menos e mais maduros) e armazenados nas condições de 0,8 kPa de O_2 , <0,5 kPa de CO_2 , $1,5 \pm 0,2$ °C e 94 ± 2 % de umidade relativa, durante 4 e 8 meses. O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado com cinco repetições de 40 frutos. Os dados obtidos nas diferentes variáveis foram submetidos as análises de variância e regressão ($p < 0,05$), e a dose de máxima resposta foi encontrada. A maioria dos efeitos benéficos do NO sobre os atributos de qualidade relacionados com o amadurecimento apresentaram máxima resposta com a aplicação de 6 $\mu\text{L L}^{-1}$ de NO, independentemente do ponto de colheita e do período de armazenamento. Contudo, a aplicação semanal de NO suprime a atividade da enzima LOX e a emissão de compostos voláteis importantes para o aroma de maçãs 'Cripps Pink', apesar de doses próximas a 6 $\mu\text{L L}^{-1}$ de NO proporcionarem incrementos nos conteúdos de compostos fenólicos totais, na atividade da catalase e na redução do estresse oxidativo após 8 meses de armazenagem em AC. A atividade antioxidante não foi afetada pela aplicação de NO. Com base nos resultados obtidos conclui-se que a aplicação semanal de 6 $\mu\text{L L}^{-1}$ de NO em AC (0,8 kPa de O_2 , <0,5 kPa de CO_2) contribui para a manutenção da qualidade maçãs 'Cripps Pink', apesar de reduzir a emissão de alguns ésteres importantes para o aroma dos frutos.

Palavras-chave: *Malus x domestica* Borkh; etileno; compostos fermentativos; perfil volátil.

ABSTRACT

The objective of this work was to evaluate the effect of the application of different doses of nitric oxide (NO), applied during the storage in controlled atmosphere (CA) on the maintenance of the quality, in the reduction of the oxidative stress and in the formation of volatile compounds of 'Cripps Pink' apples. The evaluated treatments were: 0, 1, 2, 5 and 10 $\mu\text{L L}^{-1}$ of NO. The fruits were harvested at two different harvesting points (less and riper) and stored under conditions of 0.8 kPa of O_2 , <0.5 kPa of CO_2 , 1.5 ± 0.2 °C and 94 ± 2 % of relative humidity, during 4 and 8 months. The experimental design used was completely randomized with five replications of 40 fruits. The data obtained from the different variables were submitted to analyzes of variance and regression ($p < 0.05$), and the maximum response dose was found. Most of the beneficial effects of NO on quality attributes related to ripening showed a maximum response with the application of 6 $\mu\text{L L}^{-1}$ of NO, regardless of harvest point and storage period. However, the weekly application of NO suppresses the activity of the enzyme LOX and the emission of volatile compounds important for the aroma of 'Cripps Pink' apples, although doses close to 6 $\mu\text{L L}^{-1}$ of NO provide increases in the contents of total phenolic compounds, catalase activity and reduction of oxidative stress after 8 months of storage in CA. The antioxidant activity was not affected by NO application. Based on the results obtained, it is concluded that the weekly application of 6 $\mu\text{L L}^{-1}$ of NO in AC (0.8 kPa of O_2 , <0.5 kPa of CO_2) contributes to maintaining the quality of 'Cripps Pink' apples, despite reducing the emission of some important esters for fruit aroma.

Keywords: *Malus domestica* Borkh; ethylene; fermentative compounds; volatile profile.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Taxa de produção de etileno ($\mu\text{mol C}_2\text{H}_4 \text{ Kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$) de maçãs ‘Cripps Pink’, colhidas nos estádios menos (A) e mais maduros (B), após 8 meses de armazenagem em AC e após mais 7 dias em condições ambiente, em função da aplicação semanal de diferentes concentrações de NO durante a armazenagem.....31

Figura 2 – Taxa respiratória de ($\text{nmol CO}_2 \text{ Kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$) de maçãs ‘Cripps Pink’, colhidas nos estádios menos (A e B) e mais maduros (C e D), após 4 e 8 meses de armazenagem em AC e após mais 7 dias em condições ambiente, em função da aplicação semanal de diferentes concentrações de NO durante a armazenagem.....33

Figura 3 – Coloração (h°) de fundo da epiderme de maçãs ‘Cripps Pink’, colhidas nos estádios menos (A) e mais maduros (B), após 8 meses de armazenagem em AC e após mais 7 dias em condições ambiente, em função da aplicação semanal de diferentes concentrações de NO durante a armazenagem.....35

Figura 4 – Firmeza de polpa (N) em maçãs ‘Cripps Pink’, colhidas nos estádios menos (A) e mais maduros (B), após 8 meses de armazenagem em AC e após mais 7 dias em condições ambiente, em função da aplicação semanal de diferentes concentrações de NO durante a armazenagem.....36

Figura 5 – Atividade das enzimas β -Galactosidase [após 4 e 8 meses + 7 dias em condições ambiente (A e B, respectivamente)] e poligalacturonase [após 8 meses + 7 dias em condições ambiente (C)] em maçãs ‘Cripps Pink’, colhidas no estádio mais maduro e armazenadas em AC, em função da aplicação semanal de diferentes concentrações de NO durante a armazenagem.....37

Figura 6 – Atividade da enzima β -Galactosidase em maçãs ‘Cripps Pink’, colhidas nos estádios menos maduro, após 8 meses de armazenagem em AC e mais 7 dias em

condições ambiente, em função da aplicação semanal de diferentes concentrações de NO durante a armazenagem.....38

Figura 7 – Acidez titulável (% ácido málico) em maçãs ‘Cripps Pink’, colhidas nos estádios menos maduros, após 4 (A) e 8 (B) meses de armazenagem em AC, seguidos por mais 7 dias em condições ambiente, em função da aplicação semanal de diferentes concentrações de NO durante a armazenagem.....41

Figura 8 – Incidência de podridões (%) em maçãs ‘Cripps Pink’, colhidas nos estádios de maturação menos (A e B) e mais maduros (C e D), e armazenadas em AC por 4 e 8 meses, respectivamente, com aplicação semanal de diferentes concentrações de NO.....45

Figura 9 – Teor de compostos fenólicos totais (CFT; mg EAG 100 g⁻¹) em maçãs ‘Cripps Pink’ armazenadas em AC com aplicação semanal de doses de NO durante 8 meses.....56

Figura 10 – Conteúdo de peróxido de hidrogênio (H₂O₂; g⁻¹ H₂O₂ kg⁻¹ de matéria fresca), peroxidação lipídica/teor de malonaldeído (MDA; nmol MDA g⁻¹ de matéria fresca) e atividade da enzima catalase (CAT; U⁻¹ mg⁻¹ de proteína solúvel) na polpa de maçãs ‘Cripps Pink’ armazenadas em AC com aplicação semanal de doses de NO durante 8 meses.....59

Figura 11 – Atividade da enzima lipoxigenase (LOX; U⁻¹ mg⁻¹ de proteína solúvel) de maçãs ‘Cripps Pink’ armazenadas em AC com aplicação semanal de doses de NO durante 8 meses.....61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Coloração da epiderme, índice de cor vermelha, firmeza de polpa, índice de iodo amido, sólidos solúveis e acidez titulável de maçãs 'Cripps Pink' colhidas em dois estádios de maturação.....30

Tabela 2 - Conteúdo de etanol, acetaldeído e acetato de etila maçãs 'Cripps Pink', colhidas nos estádios de maturação mais e menos maduros, e armazenadas em AC durante 8 meses, com aplicação semanal de diferentes concentrações de NO.....43

Tabela 3 - Conteúdo de compostos voláteis ($\mu\text{L L}^{-1}$) de maçãs 'Cripps Pink' armazenadas em AC com aplicação semanal de doses de NO durante 8 meses.....63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

1-MCP	1-Metilciclopropeno
AAT	Atividade antioxidante total
ABTS	2,2-azinobis-3-etilbenzotiazolin-6-ácido sulfônico
AC	Atmosfera Controlada
ACC	Ácido 1-aminociclopropano carboxílico
ADH	Álcool desidrogenase
AT	Acidez titulável
ATP	Adenosina trifosfato
AVG	Aminoetoxivinilglicina
CAT	Catalase
CFT	Compostos fenólicos totais
CV	Coeficiente de variação
DPPH	2,2-difenil-1-picril hidrazil
EROs	Espécies reativas de oxigênio
h°	Ângulo hue
ICV	Índice de cor vermelha
LOX	Lipoxigenase
MACC	Ácido 1-(malonilamino) ciclopropano-1-carboxílico
MDA	Malonaldeído
MF	Massa fresca
O	Oeste
PDC	Piruvato descarboxilase
PG	Poligalacturonase
pH	Potencial hidrogeniônico
POD	Peroxidase
PPO	Polifenoxidase
S	Sul
SAM	S-adenosilmetionina
SNP	Nitroprusiato de sódio
SOD	Superoxidodismutase
SPME	Microextração em fase sólida

SS	Sólidos solúveis
Trolox	Trolox
UR	Umidade relativa do ar
β -GAL	Betagalactosidade

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
±	Aproximadamente/desvio padrão
°Brix	Grau Brix
°C	Grau Celsius
μL ⁻¹	Microlitro
μMol	Micromol
μm	Micrometro
¹ O ₂	Oxigênio singleto
C ₂ H ₄	Etileno
C ₃ H ₄ O ₃	Ácido pirúvico
cm	Centímetro
CO ₂	Dióxido de carbono
H ₂ O ₂	Peróxido de hidrogênio
Hz	Hertz
kg ⁻¹	Kilograma
kPa	Kilopascal
L ⁻¹	Litro
g ⁻¹	Gramma
m	Metros
mg ⁻¹	Miligrama
Mg ²⁺	Magnésio
min ⁻¹	Minutos
mL	Mililitros
N	Newton
N	Normalidade
N ₂	Gás nitrogênio
NaOH	Hidróxido de sódio
NO	Óxido nítrico
NO ₂	Dióxido de nitrogênio
s ⁻¹	Segundo
O ₂	Oxigênio

O_2^-	Superóxido
OH	Radical hidroxila
U^{-1}	Unidade de atividade enzimática
®	Marca registrada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL	15
2	HIPÓTESES	18
3	OBJETIVOS	19
3.1	OBJETIVO GERAL.....	19
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
4	ÓXIDO NÍTRICO EM ATMOSFERA CONTROLADA: IMPACTO NA QUALIDADE GERAL DA FRUTA E NOS COMPOSTOS FERMENTATIVOS DE MAÇÃS ‘CRIPPS PINK’	20
4.1	INTRODUÇÃO	21
4.2	MATERIAL E MÉTODOS	23
4.2.1	Colheita dos frutos e condições de armazenamento	23
4.2.2	Avaliação dos atributos de qualidade de frutos	24
4.2.2.1	<i>Coloração de fundo da epiderme, índice de coloração vermelha e índice de iodo amido</i>	25
4.2.2.2	<i>Taxas de produção de etileno e respiratória</i>	25
4.2.2.3	<i>Incidência de podridões e oleosidade da epiderme</i>	26
4.2.2.4	<i>Sólidos solúveis (SS) e acidez titulável (AT)</i>	26
4.2.2.5	<i>Firmeza de polpa</i>	27
4.2.2.6	<i>Atividade das enzimas PG e β-GAL</i>	27
4.2.2.7	<i>Compostos do metabolismo fermentativo</i>	27
4.2.3	Desenho experimental e análise estatística	28
4.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
4.3.1	Análise inicial após a colheita	29
4.3.2	Análises após o armazenamento	30
4.3.2.1	<i>Taxas de produção de etileno e respiratória</i>	30
4.3.2.2	<i>Coloração da epiderme</i>	34
4.3.2.3	<i>Firmeza de polpa e atividade das enzimas PG e β-GAL</i>	35
4.3.2.4	<i>Sólidos solúveis e acidez titulável</i>	40
4.3.2.5	<i>Produtos do metabolismo fermentativo</i>	41
4.3.2.6	<i>Incidência de podridões e oleosidade da epiderme</i>	43
4.4	CONCLUSÃO	46

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL	15
2	HIPÓTESES	18
3	OBJETIVOS	19
3.1	OBJETIVO GERAL.....	19
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
4	ÓXIDO NÍTRICO EM ATMOSFERA CONTROLADA: IMPACTO NA QUALIDADE GERAL DA FRUTA E NOS COMPOSTOS FERMENTATIVOS DE MAÇÃS ‘CRIPPS PINK’	20
4.1	INTRODUÇÃO	21
4.2	MATERIAL E MÉTODOS	23
4.2.1	Colheita dos frutos e condições de armazenamento	23
4.2.2	Avaliação dos atributos de qualidade de frutos	24
4.2.2.1	<i>Coloração de fundo da epiderme, índice de coloração vermelha e índice de iodo amido</i>	25
4.2.2.2	<i>Taxas de produção de etileno e respiratória</i>	25
4.2.2.3	<i>Incidência de podridões e oleosidade da epiderme</i>	26
4.2.2.4	<i>Sólidos solúveis (SS) e acidez titulável (AT)</i>	26
4.2.2.5	<i>Firmeza de polpa</i>	27
4.2.2.6	<i>Atividade das enzimas PG e β-GAL</i>	27
4.2.2.7	<i>Compostos do metabolismo fermentativo</i>	27
4.2.3	Desenho experimental e análise estatística	28
4.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	29
4.3.1	Análise inicial após a colheita	29
4.3.2	Análises após o armazenamento	30
4.3.2.1	<i>Taxas de produção de etileno e respiratória</i>	30
4.3.2.2	<i>Coloração da epiderme</i>	34
4.3.2.3	<i>Firmeza de polpa e atividade das enzimas PG e β-GAL</i>	35
4.3.2.4	<i>Sólidos solúveis e acidez titulável</i>	40
4.3.2.5	<i>Produtos do metabolismo fermentativo</i>	41
4.3.2.6	<i>Incidência de podridões e oleosidade da epiderme</i>	43
4.4	CONCLUSÃO.....	46

5	IMPACTO DO ÓXIDO NÍTRICO NO PERFIL DE COMPOSTOS VOLÁTEIS E A REDUÇÃO DO ESTRESSE OXIDATIVO EM MAÇÃS ‘CRIPPS PINK’ ARMAZENADAS EM ATMOSFERA CONTROLADA.....	47
5.1	INTRODUÇÃO	48
5.2	MATERIAL E MÉTODOS	49
5.2.1	Material vegetal, desenho experimental e tratamentos	49
5.2.2	Compostos voláteis	50
5.2.3	Análises do estresse oxidativo	52
5.2.3.1	<i>Compostos fenólicos totais (CFT) e atividade antioxidante total (AAT)....</i>	<i>52</i>
5.2.3.2	<i>Determinação da atividade enzimática.....</i>	<i>52</i>
5.2.3.3	<i>Conteúdo de peróxido de hidrogênio e peroxidação lipídica</i>	<i>53</i>
5.2.4	Análise estatística	54
5.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	54
5.3.1	Conteúdo de CFT e AAT	54
5.3.2	Atividade das enzimas antioxidantes, peroxidação de lipídeos e conteúdo de H₂O₂.....	56
5.3.3	Atividade da LOX e perfil volátil.....	60
5.4	CONCLUSÃO.....	65
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	66
	REFERÊNCIAS.....	67

1 INTRODUÇÃO GERAL

A macieira é uma das espécies frutíferas mais cultivadas no Brasil e apresenta importante papel social e econômico (EPAGRI, 2021). As exportações brasileiras de maçã movimentam aproximadamente US\$ 40 milhões por ano e as previsões são de crescimento do setor, em cerca de 60% durante os próximos anos (ABPM, 2021). No Brasil, o agronegócio desta fruta localiza-se principalmente na região Sul (PETRI *et al.*, 2016).

As principais cultivares produzidas no Brasil são dos grupos Gala e Fuji, porém outras cultivares têm ganhado espaço na Região Sul (FIORAVANÇO *et al.*, 2011). Dentre essas cultivares, a ‘Cripps Pink’ destaca-se devido às características organolépticas diferenciadas dos frutos, elevada produtividade e maturação tardia, aspectos importantes para a diversificação da oferta e composição de pomares (FIORAVANÇO *et al.*, 2011). Além disso, as maçãs ‘Cripps Pink’ produzidas no Sul do Brasil apresentam potencial para serem exportadas como ‘Pink Lady®’ (STEFFENS *et al.*, 2021a).

Em razão da elevada exigência dos consumidores, somado ao fato da produção estar concentrada em um curto período do ano, faz-se necessário o uso de estratégias de armazenamento para fornecer ao mercado maçãs com qualidade, durante um longo período (STEFFENS *et al.*, 2021b). Além disso, as maçãs são frutos climatéricos e apresentam perecibilidade elevada na pós-colheita, sendo necessário a adoção de tecnologias que permitam reduzir as perdas durante o armazenamento (CHITARRA; CHITARRA, 2005). As perdas pós-colheita resultam na diminuição da quantidade e da qualidade dos frutos ofertados e são causadas principalmente devido às elevadas taxas respiratórias e de produção de etileno, bem como pela ocorrência de podridões, danos mecânicos e distúrbios fisiológicos (CHITARRA; CHITARRA, 2005).

Comercialmente, o armazenamento de maçãs é feito principalmente em atmosfera controlada (AC), na qual reduz-se as pressões parciais de oxigênio e/ou aumenta-se as pressões parciais de gás carbônico, além de reduzir a temperatura e aumentar a umidade relativa, permitindo redução do metabolismo e maior período pós-colheita dos frutos (BUTKEVICIUTE *et al.*, 2022). A maçã ‘Cripps Pink’ demonstra boa capacidade de conservação em AC, apresentando

potencial de armazenamento por até 8 meses, dependendo da composição da atmosfera (BAAB, 1999; MOGGIA & PEREIRA, 2003). Entretanto, elevadas incidências de distúrbios fisiológicos ainda são relatadas após o armazenamento de maçãs 'Cripps Pink' em AC (MDITSHWA *et al.*, 2018; FERNANDES *et al.*, 2021). Muitos destes distúrbios estão relacionados ao estresse oxidativo, decorrente do processo de amadurecimento dos frutos devido a ação do etileno (MDITSHWA *et al.*, 2018; FERNANDES *et al.*, 2021).

Atualmente, uma estratégia bastante utilizada de forma associada a AC para preservar a qualidade maçãs é o inibidor da ação do etileno 1-metilciclopropeno (1-MCP), que proporciona extensão do período de armazenamento (GOLDING; SINGH, 2017; WILLIAMSON *et al.*, 2018). Apesar dos benefícios, alguns trabalhos relatam efeitos negativos no 1-MCP sobre a qualidade dos frutos, como aumento na ocorrência de distúrbios fisiológicos, impactos negativos no aroma e maior ocorrência de podridões (MDITSHWA *et al.*, 2018; THEWES *et al.*, 2015; WATKINS, 2006). Portanto, é necessário o desenvolvimento de novas tecnologias complementares a AC que apresentem maior efetividade e que não favoreçam o desenvolvimento de distúrbios fisiológicos e podridões.

O óxido nítrico (NO) é um gás, que aplicado em baixas concentrações, pode reduzir a produção de etileno e retardar a maturação, senescência e perda de qualidade dos frutos (BUET *et al.*, 2021). O NO é um radical livre, gasoso, composto por sete elétrons do nitrogênio e oito de oxigênio (GUPTA *et al.*, 2011; PALMA *et al.*, 2019). Além disso, o NO pode atuar indiretamente na proteção das células contra o estresse oxidativo, induzindo a síntese de enzimas antioxidantes e aumentando a síntese de compostos antioxidantes, interrompendo as reações em cadeia que levam a peroxidação lipídica (PROCHÁZKOVA, 2011). O NO também realiza a ativação de enzimas do sistema antioxidante, como por exemplo, a superóxido dismutase, catalase e peroxidase, diminuindo as espécies reativas de oxigênio e os radicais hidroxila, peróxido de hidrogênio e oxigênio singleto (VIEIRA, 2013). Também existem evidências de que o NO melhora o valor funcional de maçãs por aumentar o conteúdo de compostos fenólicos e a atividade antioxidante (PALMA *et al.*, 2019).

Trabalhos realizados em diferentes espécies de frutas concluíram que o NO diminuiu a produção de etileno e as taxas respiratórias (PALMA *et al.*, 2019; STEFFENS *et al.*, 2021b; GULARTE *et al.*, 2022 a; COSER *et al.*, 2023), manteve a firmeza de polpa (SOZZI *et al.*, 2003; HENDGES *et al.*, 2016) e diminuiu a atividade da enzima ACC oxidase (BRACKMANN *et al.*, 2017). Em frutos climatéricos, como mirtilo e kiwi, o tratamento com NO também inibiu o escurecimento, diminuiu a perda de massa e aumentou a vida pós-colheita (ZHU *et al.*, 2006; PRISTIJONO *et al.*, 2008; GERGOFF *et al.*, 2017). No entanto, para que o NO tenha efeito sobre os frutos, recomenda-se a aplicação em ambiente com baixo O₂, evitando a formação de NO₂ e a perda da atividade/eficiência (GUPTA *et al.*, 2011; PALMA *et al.*, 2019). As condições de AC utilizadas no armazenamento de maçã constituem-se em um ambiente adequado para a aplicação do NO, embora também ocorra a transformação de NO em NO₂ de forma mais lenta. Portanto, a reaplicação de NO, durante o armazenamento em AC, pode permitir a sua ação contínua sobre o controle do amadurecimento e o estresse oxidativo.

Neste sentido, a AC e o NO podem ser mais eficientes quando utilizados de forma combinada (AC *plus* NO), resultando em maior qualidade das maçãs ‘Cripps Pink’ exportadas e armazenadas, maior período de comercialização e manutenção eficiente das características físico-químicas e sensoriais de frutos. Contudo, o efeito do NO depende da dose aplicada, do tempo de exposição dos frutos à substância (frequência de aplicação), da espécie vegetal e talvez até da cultivar e do estágio de maturação/ponto de colheita (STEFFENS *et al.*, 2021b; GULARTE *et al.*, 2022a; COSER *et al.*, 2023).

Atualmente, não são encontradas informações sobre dose adequada e frequência de aplicação do NO na manutenção da qualidade de maçãs ‘Cripps Pink’ armazenadas em AC. Desta forma, o presente estudo objetiva avaliar o efeito da aplicação de diferentes concentrações de óxido nítrico (NO) em atmosfera controlada (AC) sobre a manutenção da qualidade, na redução do estresse oxidativo e na formação de compostos voláteis de maçãs de maçãs ‘Cripps Pink’.

2 HIPÓTESES

Hipótese 0: Nenhuma das concentrações de óxido nítrico (NO) associadas a atmosfera controlada (AC) influência na manutenção da qualidade de maçãs 'Cripps Pink';

Hipótese 1: Maçãs 'Cripps Pink' tratadas com NO durante o armazenamento em AC, apresentam melhor manutenção dos atributos de qualidade e dos compostos voláteis, assim como, menor incidência de podridões e menor estresse oxidativo quando comparado ao uso apenas do armazenamento em AC (controle);

Hipótese 2: A melhor dose para aplicação semanal em AC encontra-se entre 2 e 5 $\mu\text{L L}^{-1}$ de NO.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o efeito da aplicação de diferentes concentrações de óxido nítrico (NO) aplicado em maçãs 'Cripps Pink' armazenadas em atmosfera controlada (AC) sobre a qualidade, redução do estresse oxidativo e formação de compostos voláteis.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar se o ponto de colheita interfere na escolha da dose de NO aplicada semanalmente em AC;
- Avaliar o efeito de diferentes doses de NO, aplicado em AC nas taxas respiratórias, produção de etileno e cor de fundo de maçãs 'Cripps Pink';
- Verificar a possível manutenção da firmeza de polpa proporcionada pelo sistema AC *plus* NO e as interferências na atividade de enzimas de parede celular;
- Avaliar o impacto das diferentes doses de NO, aplicado em AC nos compostos fermentativos e voláteis de maçãs 'Cripps Pink';
- Verificar o efeito das diferentes doses de NO, aplicadas em AC sobre o conteúdo de compostos funcionais (fenólicos e antioxidantes) de maçãs 'Cripps Pink';
- Avaliar o efeito das diferentes doses de NO, aplicada em AC sobre o estresse oxidativo em maçãs 'Cripps Pink';
- Identificar os efeitos das diferentes doses de NO, aplicado em AC na

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho evidenciou que a aplicação semanal de NO demonstra ser uma alternativa promissora no complemento da AC durante o armazenamento prolongado de maçãs 'Cripps Pink', especialmente, pelas reduções da produção de etileno, da ocorrência de podridões, do estresse oxidativo e na manutenção da firmeza de polpa dos frutos. Com base nos resultados obtidos, constata-se que a dose mais indicada, por promover efeitos benéficos na maioria dos atributos avaliados, encontra-se próxima a $6 \mu\text{L L}^{-1}$ de NO.

Apesar da redução no conteúdo de ésteres importantes, mais avaliações (como análise sensorial) são necessárias para verificar com precisão os impactos sentidos pelos consumidores na redução do aroma durante a aquisição dos frutos.

Além disso, novos estudos podem ser propostos, objetivando avaliar a combinação NO com outras tecnologias, como por exemplo o 1-MCP, que podem proporcionar resultados favoráveis na redução da oleosidade da epiderme. Ainda, a concentração de $6 \mu\text{L L}^{-1}$ de NO pode ser avaliada em outros sistemas de armazenamento, como ACD para verificação de potenciais resultados favoráveis.

REFERÊNCIAS

ABPM. Associação Brasileira dos Produtores de Maçã. **Maçã: Apple Exporters**. Disponível em: <https://www.abpm.org.br/>. Acesso em: 15 jun. 2021.

AGHDAM, M. S. *et al.* γ -Aminobutyric acid and nitric oxide treatments preserve sensory and nutritional quality of cornelian cherry fruits during postharvest cold storage by delaying softening and enhancing phenols accumulation. **Scientia Horticulturae**, v. 246, p. 812–817, fev. 2019.

ALMEIDA, A. J. P. O. *et al.* ROS: Basic concepts, sources, cellular signaling, and its implications in aging pathways. **Oxidative Medicine and Cellular Longevity**, v. 2022, p. 1–23, 19 out. 2022.

AMISSAH, J. G. N. *et al.* Nitric oxide inhibition of alcohol dehydrogenase in fresh-cut apples (*Malus domestica* Borkh). **Journal of agricultural and food chemistry**, v. 61, n. 46, p. 11076–11081, 5 nov. 2013.

ARC, E. *et al.* ABA crosstalk with ethylene and nitric oxide in seed dormancy and germination. **Frontiers in Plant Science**, v. 4, p. 63, 2013.

BAAB, G. 'Cripps Pink' (cov) die Sorte, 'Pink Lady' die Frucht. **Obstbau**, Bonn, n.5, p.266-269, 1999.

BARMAN, K. *et al.* Post-harvest nitric oxide treatment reduces chilling injury and enhances the shelf-life of mango (*Mangifera indica* L.) fruit during low-temperature storage. **The Journal of Horticultural Science and Biotechnology**, v. 89, n. 3, p. 253–260, jan. 2014.

BATISTA-SILVA, W. *et al.* Modifications in organic acid profiles during fruit development and ripening: correlation or causation? **Frontiers in Plant Science**, v. 9, p. 1689, 20 nov. 2018.

BIZJAK, J. *et al.* Changes in primary metabolites and polyphenols in the peel of "Braeburn" apples (*Malus domestica* Borkh.) during advanced maturation. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 61, n. 43, p. 10283–10292, 21 out. 2013.

BODANAPU, R. *et al.* Nitric oxide overproduction in tomato shr mutant shifts metabolic profiles and suppresses fruit growth and ripening. **Frontiers in Plant Science**, v. 7, 28 nov. 2016.

BOECKX, J. *et al.* Regulation of the fermentative metabolism in apple fruit exposed to low-oxygen stress reveals a high flexibility. **Postharvest Biology and Technology**, v. 149, p. 118–128, mar. 2019.

BOTH, V. *et al.* Effect of storage under extremely low oxygen on the volatile composition of "Royal Gala" apples. **Food Chemistry**, v. 156, p. 50–57, ago. 2014.

- BRACKMANN, A. *et al.* Ethanol and nitric oxide in quality maintenance of “Galaxy” apples stored under controlled atmosphere. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 39, n. 5, 18 dez. 2017.
- BRUCKDORFER, R. The basics about nitric oxide. **Molecular Aspects of Medicine**, v. 26, n. 1-2, p. 3–31, 1 fev. 2005.
- BUET, A. *et al.* Nitric Oxide as a Key Gasotransmitter in Fruit Postharvest: An Overview. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 40, n. 6, p. 2286–2302, 26 jun. 2021.
- BUTKEVICIUTE, A. *et al.* Impact of storage-controlled atmosphere on the apple phenolic acids, flavonoids, and anthocyanins and antioxidant activity in vitro. **Plants**, v. 11, n. 2, p. 201, 13 jan. 2022.
- CARPITA, N. C.; GIBEAUT, D. M. Structural models of primary cell walls in flowering plants: consistency of molecular structure with the physical properties of the walls during growth. **The Plant Journal**, v. 3, n. 1, p. 1–30, jan. 1993.
- CHEN, Y. *et al.* Preharvest debagging alleviates external CO₂ injury of “Fuji” apple during storage by improving antioxidant capacity and energy status. **Postharvest Biology and Technology**, v. 196, p. 112180, fev. 2023.
- CHITARRA, Maria Isabel Fernandes; CHITARRA, Adimilson Bosco. **Pós-colheita de frutas e hortaliças: Fisiologia e manuseio**. 2. ed. Lavras - Mg: UFLA, 2005. 783 p.
- Corrigan, V.K. *et al.* Sensory characteristics and consumer acceptability of ‘Pink Lady’ and other late-season apple cultivars. **New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science**, v. 25, pp.375–383, 1997.
- COSER, W. *et al.* Treatment of “Baigent” apple fruit with nitric oxide in controlled atmosphere storage reduces decay and physiological disorders. **Postharvest Biology and Technology**, v. 196, p. 112159, fev. 2023.
- CURRY, E. Effects of 1-MCP applied postharvest on epicuticular wax of apples (*Malus domestica* Borkh.) during storage. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 88, n. 6, p. 996–1006, 2008.
- DUAN, X. *et al.* Effect of nitric oxide on pericarp browning of harvested longan fruit in relation to phenolic metabolism. **Food Chemistry**, v. 104, n. 2, p. 571–576, jan. 2007.
- EPAGRI. **Safra catarinense de maçã espera colher metade da produção nacional**. 2021. Disponível em: <https://www.epagri.sc.gov.br/index.php/2021/02/11/safra-catarinense-de-maca-espera-colher-metade-da-producao-nacional/>. Acesso em: 21 dez. 2022.
- ESPINO-DÍAZ, M. *et al.* Biochemistry of apple aroma: A review. **Food Technology and Biotechnology**, v. 54, n. 4, 2016.

FAN, X.; MATTHEIS, J. P.; BLANKENSHIP, S. Development of apple superficial scald, soft scald, core flush, and greasiness is reduced by 1-MCP. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 47, n. 8, p. 3063–3068, 29 jul. 1999.

FERNANDES, R. C. *et al.* Quality of “Cripps Pink” apples stored under controlled atmosphere with ultra-low and extremely low oxygen partial pressures or treated with 1-methylcyclopropene. **Bragantia**, v. 80, 2021.

FIORAVANÇO, João Caetano; ALMEIDA, Gustavo Klamer de; CZERMANSKI, Ana Beatriz Costa; OLIVEIRA, Paulo Ricardo Dias de. **Avaliação da Cultivar de Macieira Pink Lady® em Vacaria, RS**. 112. ed. Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho, 2011. 8 p.

FORNEY, C. F. *et al.* Controlled atmosphere storage impacts fruit quality and flavor chemistry of five cultivars of highbush blueberry (*Vaccinium corymbosum*). **Postharvest Biology and Technology**, v. 194, p. 112073, dez. 2022.

GALLON, C. Z. *et al.* Atividade da celulase e β -galactosidase no estudo da firmeza da polpa de mamões “golden” e “gran golden”. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 31, n. 4, p. 1178–1183, dez. 2009.

GEIGENBERGER, P. Response of plant metabolism to too little oxygen. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 6, n. 3, p. 247–256, 1 jun. 2003.

GERGOFF GROZEFF, G. E. *et al.* Combination of nitric oxide and 1-MCP on postharvest life of the blueberry (*Vaccinium spp.*) fruit. **Postharvest Biology and Technology**, v. 133, p. 72–80, nov. 2017.

GOULAO, L. F. *et al.* Patterns of enzymatic activity of cell wall-modifying enzymes during growth and ripening of apples. **Postharvest Biology and Technology**, v. 43, n. 3, p. 307–318, mar. 2007.

GU, R. *et al.* Inhibition on brown rot disease and induction of defence response in harvested peach fruit by nitric oxide solution. **European Journal of Plant Pathology**, v. 139, n. 2, p. 369–378, 16 fev. 2014.

GULARTE, P. S. *et al.* Use of nitric oxide for ripening delay and oxidative stress reduction in Cavendish banana stored in a controlled atmosphere. **Journal of Food Processing and Preservation**, e-16926, 13 jul. 2022a.

GULARTE, P.S. *et al.* Use of nitric oxide as a strategy for postharvest controlling blue mold in 'Cripps Pink' apples. **Acta Horticulturae**, v.721, jun. 2022b.

GUO, Q. *et al.* Effects of nitric oxide treatment on the cell wall softening related enzymes and several hormones of papaya fruit during storage. **Food Science and Technology International**, v. 20, n. 4, p. 309–317, 6 jun. 2013.

GUPTA, K. J. *et al.* On the origins of nitric oxide. **Trends in Plant Science**, v. 16, n. 3, p. 160–168, mar. 2011.

Hammerschmidt, R., Nuckles, E. M.; Kuć, J. Association of enhanced peroxidase activity with induced systemic resistance of cucumber to *Colletotrichum lagenarium*. **Physiological Plant Pathology**, 20, 73–82, 1982.

HAN, M. *et al.* Regulation of the expression of lipoxygenase genes in *Prunus persica* fruit ripening. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 33, n. 4, p. 1345–1352, 24 dez. 2010.

HARB, J. *et al.* Treatments that suppress ethylene production or ethylene action modify ADH and AAT gene expression and aroma-related enzyme activities in “Delbarde Estivale” apple: consequences for the aroma profiles of fruit. **The Journal of Horticultural Science and Biotechnology**, v. 86, n. 2, p. 182–188, jan. 2011.

HEINZEN, A. S. *et al.* Blue mold control and volatile compounds in “Fuji” apples treated with chitosan emulsion combined with essential oils. **Journal of Food Processing and Preservation**, 17 set. 2022.

HENDGES, M. V. *et al.* “Packham’s Triumph” pear response to 1-methylcyclopropene and nitric oxide treatments. **Revista Caatinga**, v. 29, n. 2, p. 283–289, jun. 2016.

HONG, K. *et al.* Effects of salicylic acid and nitric oxide pretreatment on the expression of genes involved in the ethylene signalling pathway and the quality of postharvest mango fruit. **New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science**, v. 42, n. 3, p. 205–216, 20 mar. 2014.

JACOB-WILK, D. *et al.* Chlorophyll breakdown by chlorophyllase: isolation and functional expression of the Chlase1 gene from ethylene-treated Citrus fruit and its regulation during development. **The Plant Journal**, v. 20, n. 6, p. 653–661, dez. 1999.

JOHNSTON, J. W. *et al.* Temperature induces differential softening responses in apple cultivars. **Postharvest Biology and Technology**, v. 23, n. 3, p. 185–196, dez. 2001.

KANG, R. *et al.* Effect of postharvest nitric oxide treatment on the proteome of peach fruit during ripening. **Postharvest Biology and Technology**, v. 112, p. 277–289, fev. 2016.

KANNER, J.; HAREL, S.; GRANIT, R. Nitric oxide, an inhibitor of lipid oxidation by lipoxygenase, cyclooxygenase and hemoglobin. **Lipids**, v. 27, n. 1, p. 46–49, jan. 1992.

KLEIN, B. *et al.* Dynamic controlled atmosphere: Effects on the chemical composition of cuticular wax of “Cripps Pink” apples after long-term storage. **Postharvest Biology and Technology**, v. 164, p. 111170, jun. 2020.

KUMAR, R.; KHURANA, A.; SHARMA, A. K. Role of plant hormones and their interplay in development and ripening of fleshy fruits. **Journal of Experimental Botany**, v. 65, n. 16, p. 4561–4575, 1 ago. 2014.

- LARA, I. *et al.* Biosynthesis of volatile aroma compounds in pear fruit stored under long-term controlled-atmosphere conditions. **Postharvest Biology and Technology**, v. 29, n. 1, p. 29–39, jul. 2003.
- LATA, D. *et al.* Effect of eco-safe compounds on postharvest quality preservation of papaya (*Carica papaya* L.). **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 40, n. 1, 5 dez. 2017.
- LEE, J. *et al.* Antioxidant metabolism in stem and calyx end tissues in relation to flesh browning development during storage of 1-methylcyclopropene treated “Empire” apples. **Postharvest Biology and Technology**, v. 149, p. 66–73, mar. 2019.
- LESHEM, Y. Y.; PINCHASOV, Y. Non-invasive photoacoustic spectroscopic determination of relative endogenous nitric oxide and ethylene content stoichiometry during the ripening of strawberries *Fragaria ananassa* (Duch.) and avocados *Persea americana* (Mill). **Journal of Experimental Botany**, v. 51, n. 349, p. 1471–1473, ago. 2000.
- LESHEM, Y.Y. *et al.* Effect of stress nitric oxide (NO): interaction between chlorophyll fluorescence, galactolipid fluidity and lipoxygenase activity. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 35, p. 573-579, 1997.
- LI, C.; YU, W.; LIAO, W. Role of nitric oxide in postharvest senescence of fruits. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 23, n. 17, p. 10046, 2 set. 2022.
- LI, G. *et al.* Exogenous nitric oxide induces disease resistance against *Monilinia fructicola* through activating the phenylpropanoid pathway in peach fruit. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 97, n. 9, p. 3030–3038, 27 dez. 2016.
- LI, H. *et al.* Phenolic profiling of five different Australian grown apples. **Applied Sciences**, v. 11, n. 5, p. 2421, 9 mar. 2021.
- LIU, Y. *et al.* Postharvest application of MeJA and NO reduced chilling injury in cucumber (*Cucumis sativus*) through inhibition of H₂O₂ accumulation. **Postharvest Biology and Technology**, v. 119, p. 77–83, set. 2016.
- LÓPEZ, M. L. *et al.* Volatile compounds, quality parameters and consumer acceptance of “Pink Lady®” apples stored in different conditions. **Postharvest Biology and Technology**, v. 43, n. 1, p. 55–66, jan. 2007.
- LUDWIG, V. *et al.* Volatile compounds profile and quality of “Cripps pink” apple: Impact of dynamic controlled atmosphere combined to delayed storage and 1-MCP treatment. **Journal of Food Processing and Preservation**, 6 out. 2022.
- MA, Y. *et al.* 1-Methylcyclopropene, storage time, and shelf life and temperature affect phenolic compounds and antioxidant activity of “Jonagold” apple. **Postharvest Biology and Technology**, v. 150, p. 71–79, abr. 2019.

- MACHADO, M. R. *et al.* Nitric oxide supply reduces ethylene production, softening and weight loss in papaya fruit. **Bragantia**, v. 81, 2022.
- MANJUNATHA, G.; LOKESH, V.; NEELWARNE, B. Nitric oxide in fruit ripening: Trends and opportunities. **Biotechnology Advances**, v. 28, n. 4, p. 489–499, jul. 2010.
- MDITSHWA, A. *et al.* Recent developments on dynamic controlled atmosphere storage of apples—A review. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 16, p. 59–68, jun. 2018.
- MEITHA, K. *et al.* Reactive oxygen species and antioxidants in postharvest vegetables and fruits. **International Journal of Food Science**, v. 2020, p. 1–11, 11 dez. 2020.
- MITTLER, R. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. **Trends in Plant Science**, v. 7, n. 9, p. 405–410, set. 2002.
- MILLAR, A. *et al.* Nitric oxide inhibits the cytochrome oxidase but not the alternative oxidase of plant mitochondria. **FEBS Letters**, v. 398, n. 2-3, p. 155–158, 2 dez. 1996.
- MOGGIA, C.; PEREIRA, M. **Manzanas Pink Lady**. Talca: Pomáceas, 2003. V.3, p.1-3. (Boletim Técnico, 4).
- MUKHERJEE, S. Recent advancements in the mechanism of nitric oxide signaling associated with hydrogen sulfide and melatonin crosstalk during ethylene-induced fruit ripening in plants. **Nitric Oxide**, v. 82, p. 25–34, jan. 2019.
- MUR, L. A. J. *et al.* Moving nitrogen to the centre of plant defence against pathogens. **Annals of Botany**, p.179, 2017.
- MUR, L. A. J. *et al.* NO way to live; the various roles of nitric oxide in plant–pathogen interactions. **Journal of Experimental Botany**, v. 57, n. 3, p. 489–505, 2006.
- ONIK, J. C. *et al.* Melatonin treatment reduces ethylene production and maintains fruit quality in apple during postharvest storage. **Food Chemistry**, v. 337, p. 127753, fev. 2021.
- PANDEY, S. *et al.* Nitric oxide accelerates germination via the regulation of respiration in chickpea. **Journal of Experimental Botany**, v. 70, n. 17, p. 4539–4555, 24 abr. 2019.
- PANZELLA, L. *et al.* A reappraisal of traditional apple cultivars from Southern Italy as a rich source of phenols with superior antioxidant activity. **Food Chemistry**, v. 140, n. 4, p. 672–679, out. 2013.

PARK, D. *et al.* Fermentative metabolism of three apple cultivars during storage under low partial pressures of oxygen. **Postharvest Biology and Technology**, v. 193, p. 112037, nov. 2022.

PATHAK, N.; SANWAL, G. G. Multiple forms of polygalacturonase from banana fruits. **Phytochemistry**, v. 48, n. 2, p. 249–255, maio 1998.

PAYASI, A. *et al.* Biochemistry of fruit softening: an overview. **Physiology and Molecular Biology of Plants**, v. 15, n. 2, p. 103–113, abr. 2009.

PETRI, J. L., SEZERINO, A. A., MARTIN, M. S. **Estado atual da cultura da macieira**. Epagri/Estação Experimental de Caçador, 2016

Pink Lady (2020). **A produção e o controle de qualidade de maçãs Pink Lady®**. Disponível em: <<https://www.maca-pinklady.com/pt/qualidade/>>. Acesso em: 24 out. 2022.

POLS, S. *et al.* The regulatory role of nitric oxide and its significance for future postharvest applications. **Postharvest Biology and Technology**, v. 188, p. 111869, jun. 2022.

PRISTIJONO, P. *et al.* Use of the nitric oxide-donor compound, diethylenetriamine-nitric oxide (DETANO), as an inhibitor of browning in apple slices. **The Journal of Horticultural Science and Biotechnology**, v. 83, n. 5, p. 555–558, jan. 2008.

PROCHÁZKOVÁ, D.; WILHELMOVÁ, N. Nitric oxide, reactive nitrogen species and associated enzymes during plant senescence. **Nitric Oxide**, v. 24, n. 2, p. 61–65, mar. 2011.

REN, Y. *et al.* Nitric oxide alleviates deterioration and preserves antioxidant properties in “Tainong” mango fruit during ripening. **Horticulture, Environment, and Biotechnology**, v. 58, n. 1, p. 27–37, fev. 2017.

RUFINO, M. S.M. *et al.* **Metodologia científica: determinação da atividade antioxidante total em frutas pela captura do radical livre ABTS**. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, 4p. (Comunicado técnico, 128), 2007a.

RUFINO, M.S.M. *et al.* **Metodologia científica: determinação da atividade antioxidante total em frutas pela captura do radical livre DPPH**. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, 4p. (Comunicado Técnico, 127) 2007b.

RUIZ-HERNÁNDEZ, V. *et al.* A comparison of semi-quantitative methods suitable for establishing volatile profiles. **Plant Methods**, v. 14, n. 1, p.1-15, 2018.

SAHU, S. K. *et al.* Nitric oxide application for postharvest quality retention of guava fruits. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 42, n. 10, 16 set. 2020.

SALAS, N. A. *et al.* Volatile production by “Golden Delicious” apples is affected by preharvest application of aminoethoxyvinylglycine. **Scientia Horticulturae**, v. 130, n. 2, p. 436–444, set. 2011.

SERRA, S. *et al.* Determination of post-harvest biochemical composition, enzymatic activities, and oxidative browning in 14 apple cultivars. **Foods**, v. 10, n. 1, p. 186, 18 jan. 2021.

SHAHKOO MAHALLY, S. *et al.* Postharvest nitric oxide treatment of persimmon (*Diospyros kaki*.) improves fruit quality during storage. **Fruits**, v. 70, n. 2, p. 63–68, mar. 2015.

SHARMA, P. *et al.* Reactive Oxygen Species, Oxidative Damage, and Antioxidative Defense Mechanism in Plants under Stressful Conditions. **Journal of Botany**, v. 2012, p. 1–26, 24 abr. 2012.

SHAUN BUSS, D. Oxidative stress defence response of *Carica papaya* challenged by nitric oxide, papaya meleira virus and *Saccharomyces cerevisiae*. **The Open Nitric Oxide Journal**, v. 3, n. 1, p. 55–64, 13 dez. 2011.

SILVA, F. A. S.; AZEVEDO, C. A. V. The Assisat Software Version 7.7 and its use in the analysis of experimental data. **African Journal of Agricultural Research**, v. 11, n. 39, p. 3733–3740, 2016.

SINGH, S. P. *et al.* Postharvest nitric oxide fumigation delays fruit ripening and alleviates chilling injury during cold storage of Japanese plums (*Prunus salicina* Lindell). **Postharvest Biology and Technology**, v. 53, n. 3, p. 101–108, set. 2009.

STANGER, M. C. *et al.* Phenolic content and antioxidant activity during the development of “Brookfield” and “Mishima” apples. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 65, n. 17, p. 3453–3459, 24 abr. 2017.

STEFFENS, C. A. *et al.* Quality of “Cripps Pink” apples following the application of 1-MCP, ethanol vapor and nitric oxide as pretreatments for controlled atmosphere storage. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 46, n. 1, 6 nov. 2021a.

STEFFENS, C. A. *et al.* Treatment with nitric oxide preserves the quality of cold stored “Cripps Pink” apples. **Bragantia**, v. 80, 2021b.

STREIT, N. M. *et al.* As clorofilas. **Ciência Rural**, v. 35, n. 3, p. 748–755, jun. 2005.

SUN, C. *et al.* Molecular functions of nitric oxide and its potential applications in horticultural crops. **Horticulture Research**, v. 8, n. 1, 1 abr. 2021.

SUN, L. *et al.* Effect of nitric oxide on alcoholic fermentation and qualities of chinese winter jujube during storage. **Agricultural Sciences in China**, v. 6, n. 7, p. 849–856, jul. 2007.

THEWES, F. R. *et al.* 1-methylcyclopropene suppresses anaerobic metabolism in apples stored under dynamic controlled atmosphere monitored by respiratory quotient. **Scientia Horticulturae**, v. 227, p. 288–295, jan. 2018.

THEWES, F. R. *et al.* Dynamic controlled atmosphere: Does the frequency of respiratory quotient determination during storage affect apple fruit metabolism and quality? **Postharvest Biology and Technology**, v. 194, p. 112097, dez. 2022.

THEWES, F. R. *et al.* Dynamics of sugars, anaerobic metabolism enzymes and metabolites in apples stored under dynamic controlled atmosphere. **Scientia Horticulturae**, v. 255, p. 145–152, set. 2019.

THEWES, F. R. *et al.* The different impacts of dynamic controlled atmosphere and controlled atmosphere storage in the quality attributes of “Fuji Suprema” apples. **Postharvest Biology and Technology**, v. 130, p. 7–20, ago. 2017.

THEWES, F.R. *et al.* 1-methylcyclopropene effects on volatile profile and quality of ‘Royal Gala’ apples produced in Southern Brazil and stored in controlled atmosphere. **Ciência Rural**, v.45, n.12, p.2259-2266, 2015.

VALL-LLAURA, N. *et al.* Untangling the role of ethylene beyond fruit development and ripening: A physiological and molecular perspective focused on the Monilinia-peach interaction. **Scientia Horticulturae**, v. 301, p. 111123, jul. 2022.

VELÁZQUEZ-LÓPEZ, A. A. *et al.* Lipoxygenase and Its Relationship with Ethylene During Ripening of Genetically Modified Tomato (*Solanum lycopersicum*). **Food technology and biotechnology**, v. 58, n. 2, p. 223–229, 31 jul. 2020.

WANG, Y. *et al.* Effect of nitric oxide on antioxidative response and proline metabolism in banana during cold storage. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 61, n. 37, p. 8880–8887, 9 set. 2013.

WANG, Y. *et al.* Nitric oxide delays chlorophyll degradation and enhances antioxidant activity in banana fruits after cold storage. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 37, n. 4, 19 mar. 2015.

WASZCZAK, C.; CARMODY, M.; KANGASJÄRVI, J. Reactive oxygen species in plant signaling. **Annual Review of Plant Biology**, v. 69, n. 1, p. 209–236, 29 abr. 2018.

WATKINS, C. B. The use of 1-methylcyclopropene (1-MCP) on fruits and vegetables. **Biotechnology Advances**, v.24, n.4, p.389-409, 2006.

WEBER, A. *et al.* Dynamic controlled atmosphere: Impact of elevated storage temperature on anaerobic metabolism and quality of “Nicoter” apples. **Food Chemistry**, v. 298, p. 125017, nov. 2019.

- WEI, J. *et al.* Changes and postharvest regulation of activity and gene expression of enzymes related to cell wall degradation in ripening apple fruit. **Postharvest Biology and Technology**, v. 56, n. 2, p. 147–154, 2010.
- WU, B. *et al.* Impact of postharvest nitric oxide treatment on antioxidant enzymes and related genes in banana fruit in response to chilling tolerance. **Postharvest Biology and Technology**, v. 92, p. 157–163, jun. 2014.
- WU, F. *et al.* Effects of nitric oxide on reactive oxygen species and antioxidant capacity in Chinese Bayberry during storage. **Scientia Horticulturae**, v. 135, p. 106–111, fev. 2012.
- YAHIA, E. M. *et al.* **Carbohydrates**. In: YAHIA, E. M. (org.) **Postharvest Physiology and Biochemistry of Fruits and Vegetables**, 1 ed. Inglaterra: Elsevier/Woodhead Publishing, 2019. cap. 9, p. 175–205.
- YAN, D. *et al.* Integration of morphological, physiological and multi-omics analysis reveals a comprehensive mechanism for cuticular wax during development of greasiness in postharvest apples. **Food Research International**, v. 157, p. 111429, jul. 2022.
- YANG, H. *et al.* Analysis of β -galactosidase during fruit development and ripening in two different texture types of apple cultivars. **Frontiers in Plant Science**, v. 9, 24 abr. 2018.
- YANG, Y. *et al.* Analysis of the inhibitory effect of 1-Methylcyclopropene on skin greasiness in postharvest apples by revealing the changes of wax constituents and gene expression. **Postharvest Biology and Technology**, v. 134, p. 87–97, dez. 2017b.
- YANG, Y. *et al.* Relationships between cuticular waxes and skin greasiness of apples during storage. **Postharvest Biology and Technology**, v. 131, p. 55–67, set. 2017a.
- YIN, J. *et al.* Effect of nitric oxide on the activity of phenylalanine ammonia-lyase and antioxidative response in sweetpotato root in relation to wound-healing. **Postharvest Biology and Technology**, v. 74, p. 125–131, dez. 2012.
- ZHANG, L. *et al.* Effects of calcium and pectin methylesterase on quality attributes and pectin morphology of jujube fruit under vacuum impregnation during storage. **Food Chemistry**, v. 289, p. 40–48, ago. 2019.
- ZHANG, Q. *et al.* Postharvest applications of n-butanol increase greasiness in apple skins by altering wax composition via effects on gene expression. **Postharvest Biology and Technology**, v. 155, p. 111–119, set. 2019.
- ZHANG, T. *et al.* Effect of nitric oxide treatment on chilling injury, antioxidant enzymes and expression of the CmCBF1 and CmCBF3 genes in cold-stored

Hami melon (*Cucumis melo* L.) fruit. **Postharvest Biology and Technology**, v. 127, p. 88–98, mai. 2017.

ZHAO, Y. *et al.* Effects of nitric oxide fumigation treatment on retarding cell wall degradation and delaying softening of winter jujube (*Ziziphus jujuba* Mill. cv. Dongzao) fruit during storage. **Postharvest Biology and Technology**, v. 156, p. 110954, out. 2019.

ZHENG, S. *et al.* Nitric oxide effects on postharvest and *Alternaria*-infected pear fruit. **Postharvest Biology and Technology**, v. 195, p. 112118, jan. 2023.

ZHENG, X. *et al.* Mengmeng. Changes in quality and defense resistance of kiwifruit in response to nitric oxide treatment during storage at room temperature. **Scientia Horticulturae**, v. 222, p. 187-192, ago. 2017. Elsevier BV.

ZHU, S. *et al.* Effects of different nitric oxide application on quality of kiwifruit during 20 °C storage. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 45, n. 2, p. 245–251, fev. 2010.

ZHU, S.; LIU, M.; ZHOU, J. Inhibition by nitric oxide of ethylene biosynthesis and lipoxygenase activity in peach fruit during storage. **Postharvest Biology and Technology**, v. 42, n. 1, p. 41–48, out. 2006.

ZHU, S.; SUN, L.; ZHOU, J. Effects of different nitric oxide application on quality of kiwifruit during 20 °C storage. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 45, n. 2, p. 245–251, fev. 2010.

ZHUANG, H. *et al.* Senescence of Broccoli Buds Is Related to Changes in Lipid Peroxidation. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 43, n. 10, p. 2585–2591, out. 1995.

ZUCCARELLI, R. *et al.* Multifaceted roles of nitric oxide in tomato fruit ripening: NO-induced metabolic rewiring and consequences for fruit quality traits. **Journal of Experimental Botany**, v. 72, n. 3, p. 941–958, 9 nov. 2020.