

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

Magno Roberto Pasquetti Berghetti

**QUALIDADE FISIOLÓGICA DE SEMENTES DE FEIJÃO E SOJA  
ARMAZENADAS EM ATMOSFERA CONTROLADA SOB  
DIFERENTES TEMPERATURAS**

SANTA MARIA, RS  
2024

Magno Roberto Pasquetti Berghetti

**QUALIDADE FISIOLÓGICA DE SEMENTES DE FEIJÃO E SOJA  
ARMAZENADAS EM ATMOSFERA CONTROLADA SOB DIFERENTES  
TEMPERATURAS**

Defesa de Doutorado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Agronomia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Doutor em Agronomia**.

Orientador: Prof. Dr<sup>o</sup>. Auri Brackmann

SANTA MARIA, RS  
2024

BERGHETTI, MAGNO ROBERTO PASQUETTI  
QUALIDADE FISIOLÓGICA DE SEMENTES DE FEIJÃO E SOJA  
ARMAZENADAS EM ATMOSFERA CONTROLADA SOB DIFERENTES  
TEMPERATURAS / MAGNO ROBERTO PASQUETTI BERGHETTI.- 2024.  
118 p.; 30 cm

Orientador: AURI BRACKMANN  
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós  
Graduação em Agronomia, RS, 2024

1. Armazenamento 2. Pós-colheita 3. Potencial  
fisiológico 4. Tecnologia de sementes I. BRACKMANN, AURI  
II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

Declaro, MAGNO ROBERTO PASQUETTI BERGHETTI, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Tese) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

**Magno Roberto Pasquetti Berghetti**

**QUALIDADE FISIOLÓGICA DE SEMENTES DE FEIJÃO E SOJA  
ARMAZENADAS EM ATMOSFERA CONTROLADA SOB DIFERENTES  
TEMPERATURAS**

Defesa de Doutorado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Agronomia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Doutor em Agronomia**.

Aprovada em 01 de 03 de 2024

---

**Auri Brackmann, Prof. Dr. (UFSM)**  
(Presidente/Orientador)

---

**Liege Camargo da Costa, Dr<sup>a</sup>. (Departamento de Diagnóstico e Pesquisa Agropecuária-  
Júlio de Castilhos)**

---

**Paulo Carteri Coradi, Prof. Dr. (UFSM-Campus Cachoeira do Sul)**

---

**Geri Eduardo Meneghello, Prof. Dr. (UFPEL-Universidade Federal de Pelotas)**

---

**Francisco Amaral Villela, Prof. Dr. (UFPEL-Universidade Federal de Pelotas)**

Santa Maria, RS  
2024

## **DEDICATÓRIA**

*Dedico essa Tese à minha família, em especial aos meus pais Aderli e Marilei e ao meu irmão Álvaro, pelos ensinamentos e incentivos nessa jornada.*

## **AGRADECIMENTOS**

Á Deus, por guiar meus passos.

À Universidade Federal de Santa Maria e ao Programa de Pós-graduação em Agronomia pela oportunidade de realizar este estudo.

Ao CNPq, pela concessão da bolsa.

Ao professor Dr. Auri Brackmann pela orientação e amizade durante a minha Graduação e Pós-Graduação.

Ao professor Dr. Vanderlei Both, pelo companheirismo, auxílio e sugestões para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas de pós-graduação Wagner, Lucas, Francis, Fábio e Flávio pelo apoio e companheirismo durante o doutorado.

A todos os colegas de iniciação científica do Núcleo de Pesquisa em Pós-colheita pela ajuda na condução dos experimentos.

Ao Departamento de Diagnóstico de Pesquisa Agropecuária de Júlio de Castilhos-RS (FEPAGRO), pelo empenho e ajuda na condução dos experimentos à campo.

A todos os professores e funcionários e órgãos da UFSM que fizeram parte dessa caminhada.

Ao Laboratório de Fisiologia e Bioquímica de Plantas (FisioPlant), pelo apoio na realização do trabalho.

Ao Grupo de Pesquisa em Ecofisiologia e Manejo de Culturas Anuais (GEMCA), pelo apoio na realização do trabalho.

**MUITO OBRIGADO!**

## RESUMO

### QUALIDADE FISIOLÓGICA DE SEMENTES DE FEIJÃO E SOJA ARMAZENADAS EM ATMOSFERA CONTROLADA SOB DIFERENTES TEMPERATURAS

AUTOR: Magno Roberto Pasquetti Berghetti

ORIENTADOR: Auri Brackmann

O armazenamento de sementes é uma das etapas cruciais na produção agrícola, pois tem grande influência na expressão do potencial produtivo das plantas. Embora haja diversas tecnologias de armazenamento, grande parte da qualidade fisiológica das sementes ainda é perdida devido a condições inadequadas utilizadas ao longo do armazenamento. O objetivo do trabalho foi avaliar o efeito de baixas pressões parciais de oxigênio ( $pO_2$ ) e altas de gás carbônico ( $pCO_2$ ), no armazenamento em atmosfera controlada, combinadas com diferentes temperaturas sobre a manutenção do potencial fisiológico de sementes de feijão e soja e seus efeitos na produtividade. Na safra de 2020/21, sementes de feijão das cultivares Fepagro Triunfo e Fepagro Garapiá e de soja da cultivar NA 5909 RR foram armazenadas durante oito meses nas seguintes condições: [1] ambiente; [2] 1,0 kPa  $O_2$  + 0,04 kPa  $CO_2$ ; [3] 1,0 kPa  $O_2$  + 15,0 kPa  $CO_2$  nas temperaturas de 10, 15, 20 e 25 °C. Na safra de 2021/22, sementes da cultivar F. Triunfo e soja da cultivar NA 5909 RR foram armazenadas durante seis meses nas seguintes condições: [1] ambiente; [2] 1,0 kPa  $O_2$  + 0,0 kPa  $CO_2$ ; [3] 3,0 kPa  $O_2$  + 0,0 kPa  $CO_2$  e [4] 5,0 kPa  $O_2$  + 0,0 kPa  $CO_2$  nas temperaturas de 10, 15 e 20 °C. As avaliações realizadas após o armazenamento das sementes foram: teor de água, perda de massa, condutividade elétrica, teste padrão de germinação, comprimento de plântulas, massa seca de plântulas, atividade das enzimas guaiacol peroxidase e superóxido dismutase e o conteúdo de peróxido de hidrogênio. Após a semeadura, foram avaliadas: emergência a campo, altura de plantas, índice de área foliar e produtividade. De maneira geral, nos dois anos de avaliação as sementes armazenadas em temperaturas de 10 °C com a utilização de atmosfera controlada (1,0 kPa  $O_2$ ) mantiveram maior qualidade fisiológica durante o armazenamento dentre as variáveis avaliadas. As cultivares de feijão e soja armazenadas sob baixo oxigênio (1,0 kPa  $O_2$ ) apresentaram acréscimo de produtividade em comparação à condição Ambiente e a utilização de temperaturas mais elevadas durante o armazenamento, como 15, 20 e 25 °C para a soja cultivar NA 5909 RR e feijão cv. F. Garapiá e em 25 °C o feijão cv. F. Triunfo apresentou menor manutenção da qualidade fisiológica em comparação às sementes armazenadas sob 10°C. Não houve efeito aditivo de altas concentrações de  $CO_2$  ao baixo nível de  $O_2$  na atmosfera do silo na manutenção da qualidade das sementes.

**Palavras-chave:** Armazenamento, Pós-colheita, Potencial fisiológico, Tecnologia de sementes.

## ABSTRACT

### PHYSIOLOGICAL QUALITY OF BEAN AND SOY SEEDS STORED IN CONTROLLED ATMOSPHERES UNDER DIFFERENT TEMPERATURES

AUTHOR: Magno Roberto Pasquetti Berghetti

ADVISOR: Auri Brackmann

Seed storage is one of the crucial steps in agricultural production, because it has a great influence on the expression of the plants' productive potential. Although there are several storage technologies, much of the seeds physiological quality is still lost due to inadequate conditions used during storage. The main objective of the research was to evaluate the effect of low oxygen partial pressures ( $pO_2$ ) and high carbon dioxide partial pressures carbon dioxide ( $pCO_2$ ), in controlled atmosphere storage, combined with different temperatures on the maintenance of the physiological potential of bean and soybean seeds and their effects on productivity. In the 2020/21 harvest, bean seeds from the Fepagro Triunfo and Fepagro Garapiá cultivars and soybean seeds from the NA 5909 RR cultivar were stored for eight months under the following conditions: [1] Ambient; [2] 1.0 kPa  $O_2$  + 0.04 kPa  $CO_2$ ; [3] 1.0 kPa  $O_2$  + 15.0 kPa  $CO_2$  at temperatures of 10, 15, 20 and 25 °C. In the 2021/22 harvest, seeds of the cultivar F. Triunfo and soybeans of the cultivar NA 5909 RR were stored for six months under the following conditions: [1] Ambient; [2] 1.0 kPa  $O_2$  + 0.0 kPa  $CO_2$ ; [3] 3.0 kPa  $O_2$  + 0.0 kPa  $CO_2$  and [4] 5.0 kPa  $O_2$  + 0.0 kPa  $CO_2$  at temperatures of 10, 15 and 20 °C. The evaluations carried out after seed storage were: Water content, mass loss, electrical conductivity, standard germination test, seedling length, seedling dry mass, activity of the enzymes guaiacol peroxidase and superoxide dismutase and hydrogen peroxide content. After sowing, the following parameters were evaluated: field emergence, plant height, leaf area index and productivity. In general, in the two years of evaluation, seeds stored at temperatures of 10 °C using a controlled atmosphere (CA) maintained the highest physiological quality during storage among the variables evaluated. Bean and soybean cultivars stored under low oxygen (1.0 kPa  $O_2$ ) showed increased productivity compared to the Ambient condition and the use of higher temperatures during storage, such as 15, 20 and 25 °C for soybean cv. NA5909 RR and bean cv. F. Garapiá and at 25 °C beans cv. F. Triunfo showed less physiological quality maintenance compared to seeds stored at 10°C. There was no additive effect of high concentrations of  $CO_2$  to the low level of  $O_2$  in the silo atmosphere on maintaining seed quality.

**Keywords:** Storage, Postharvest, Physiological potential, Seed technology.

## LISTA DE FIGURAS

ARTIGO 1.....	29
Figure 1- Experimental localization map, cities of Santa Maria and Julio de Castilhos-RS, Brazil, 2021.....	34
Figure 2- Installation scheme of the atmosphere (O <sub>2</sub> e CO <sub>2</sub> ) through the nitrogen generator and high-pressure cylinder of carbonic gas, Santa Maria, 2023.....	35
Figure 3a- Electrical conductivity, thousand seed weight, moisture content and soybean germination test of cultivar NA 5909 RR after storage for 6 months in different temperatures and controlled atmosphere conditions. Squares with the lower-case and upper-case letters so not differ, respectively, between temperatures in the same condition and between the same temperatures in the three conditions by the Scott-Knott test (p<0,05). *LSD= Least Significant Difference, Santa Maria, 2021. ....	42
Figure 3b- Electrical conductivity, water content and germination test of soybean of cultivar NA 5909 RR after storage for 6 months in different temperatures and controlled atmosphere conditions. Squares with the lower-case and upper-case letters so not differ, respectively, between temperatures in the same condition and between the same temperatures in the three conditions by the Scott-Knott test (p<0,05). * LSD= Least Significant Difference, Santa Maria, 2022.....	44
Figure 4a- Total length of seedlings and seedling dry matter of soybean of cultivar NA 5909 RR after storage for 6 months in different temperatures and controlled atmosphere conditions. Squares with the lower-case and upper-case letters so not differ, respectively, between temperatures in the same condition and between the same temperatures in the three conditions by the Scott-Knott test (p<0,05). * LSD= Least Significant Difference, Santa Maria, 2021.....	45
Figure 4b- Length of seedlings, loss of seed mass and seedling dry matter of soybean of cultivar NA 5909 RR after storage storage for 6 months in different temperatures and controlled atmosphere conditions. Squares with the lower-case and upper-case letters so not differ, respectively, between temperatures in the same condition and between the same temperatures in the three conditions by the Scott-Knott test (p<0,05). * LSD= Least Significant Difference, Santa Maria, 2022.....	47
Figure 5a- Activity of the enzymes superoxide dismutase-SOD (a), guaiacol peroxidase-POD (b), and content of hydrogen peroxide-H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (c) of soybean of cultivar NA 5909 RR after storage storage for 6 months in different temperatures and controlled atmosphere conditions. Bars with the same lower-case letters in the same temperature and bars with the same upper-case letters in different temperatures do not differ by the Scott-Knott test (p <0,05) at 5% probability. Error bars represent standard deviations, Santa Maria, 2021.....	49
Figure 5b-Activity of the enzymes superoxide dismutase-SOD (a), guaiacol peroxidase-POD (b), and contentof hydrogen peroxide-H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (c) of soybean of cultivar NA 5909 RR after storage storage for 6 months in different temperatures and controlled atmosphere conditions. Bars with the same lower-case letters in the same temperature and bars with the same upper-case letters in different temperatures do not differ by the Scott-Knott test (p <0,05) at 5% probability. Error bars represent standard deviations, Santa Maria, 2021.....	51
Figure 6a- Seed field emergency of soybean of cultivar NA 5909 RR after storage storage for 6 months in different temperatures and controlled atmosphere conditions. Bars	

with the same lower-case letters in the same temperature and bars with the same upper-case letters in different temperatures do not differ by the Scott-Knott test ( $p < 0,05$ ) at 5% probability. Error bars represent standard deviations, Santa Maria, 2021. ....	52
Figure 6b-Seed field emergency of soybean of cultivar NA 5909 RR after storage storage for 6 months in different temperatures and controlled atmosphere conditions. Bars with the same lower-case letters in the same temperature and bars with the same upper-case letters in different temperatures do not differ by the Scott-Knott test ( $p < 0,05$ ) at 5% probability. Error bars represent standard deviations, Santa Maria, 2022. ....	52
Figure 7a- Plant height of soybean of cultivar NA 5909 RR after storage storage for 6 months in different temperatures and controlled atmosphere conditions. Bars with the same lower-case letters in the same temperature and bars with the same upper-case letters in different temperatures do not differ by the Scott-Knott test ( $p < 0,05$ ) at 5% probability. Error bars represent standard deviations, Santa Maria, 2021. .	54
Figure 7b-Plant height of soybean of cultivar NA 5909 RR after storage storage for 6 months in different temperatures and controlled atmosphere conditions. Bars with the same lower-case letters in the same temperature and bars with the same upper-case letters in different temperatures do not differ by the Scott-Knott test ( $p < 0,05$ ) at 5% probability. Error bars represent standard deviations, Santa Maria, 2022. .	55
Figure 8a- Leaf area index (LAI) of soybean of cultivar NA 5909 RR after storage storage for 6 months in different temperatures and controlled atmosphere conditions. Bars with the same lower-case letters in the same temperature and bars with the same upper-case letters in different temperatures do not differ by the Scott-Knott test ( $p < 0,05$ ) at 5% probability. Error bars represent standard deviations, Santa Maria, 2021. ....	57
Figure 8b-Leaf area index (LAI) of soybean of cultivar NA 5909 RR after storage storage for 6 months in different temperatures and controlled atmosphere conditions. Bars with the same lower-case letters in the same temperature and bars with the same upper-case letters in different temperatures do not differ by the Scott-Knott test ( $p < 0,05$ ) at 5% probability. Error bars represent standard deviations, Santa Maria, 2022. ....	58
Figure 9a- Productivity of soybean of cultivar NA 5909 RR after storage storage for 6 months in different temperatures and controlled atmosphere conditions. Bars with the same lower-case letters in the same temperature and bars with the same upper-case letters in different temperatures do not differ by the Scott-Knott test ( $p < 0,05$ ) at 5% probability. Error bars represent standard deviations, Santa Maria, 2021. .	59
Figure 9b- Productivity of soybean of cultivar NA 5909 RR after storage storage for 6 months in different temperatures and controlled atmosphere conditions. Bars with the same lower-case letters in the same temperature and bars with the same upper-case letters in different temperatures do not differ by the Scott-Knott test ( $p < 0,05$ ) at 5% probability. Error bars represent standard deviations, Santa Maria, 2022. .	60
ARTIGO 2.....	69
Figura 1- Mapa de localização experimental. Municípios de Santa Maria e Júlio de Castilhos – RS, Brasil,2021.....	72
Figura 2- Esquema de instalação da atmosfera ( $O_2$ e $CO_2$ ) através do gerador de nitrogênio e cilindro de alta pressão de gás carbônico, Santa Maria, 2023.....	74

- Figura 2a - Condutividade elétrica, peso de mil sementes, teor de água e germinação de feijão cv. Fepagro Triunfo, armazenado em atmosfera controlada (AC) durante dois, quatro, seis e oito meses nas temperaturas de 10, 15, 20 e 25 °C. Quadrados com letras minúsculas e maiúsculas iguais não diferem, respectivamente, entre as temperaturas na mesma condição e entre as mesmas temperaturas nas três condições pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ). \*DMS= Diferença mínima significativa..... 80
- Figura 2b- Condutividade elétrica, peso de mil sementes, teor de água e germinação de feijão cv. Fepagro Garapiá, armazenado em AC durante seis meses nas temperaturas de 10, 15, 20 e 25 °C. Quadrados com letras minúsculas e maiúsculas iguais não diferem, respectivamente, entre as temperaturas na mesma condição e entre as mesmas temperaturas nas três condições pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ). \*DMS= Diferença mínima significativa..... 83
- Figura 3a- Comprimento total e massa seca de plântulas de feijão cv. Fepagro Triunfo obtidas de sementes armazenadas em AC durante seis meses nas temperaturas de 10, 15, 20 e 25 °C. Quadrados com letras minúsculas e maiúsculas iguais não diferem, respectivamente, entre as temperaturas na mesma condição e entre as mesmas temperaturas nas três condições pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ). \*DMS= Diferença mínima significativa..... 84
- Figura 3b- Comprimento total e massa seca de plântulas de feijão cv. Fepagro Garapiá obtidas de sementes armazenadas em AC durante seis meses nas temperaturas de 10, 15, 20 e 25 °C. Quadrados com letras minúsculas e maiúsculas iguais não diferem, respectivamente, entre as temperaturas na mesma condição e entre as mesmas temperaturas nas três condições pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ). \*DMS= Diferença mínima significativa..... 85
- Figura 4a- Condutividade elétrica, teor de água e germinação de sementes de feijão cv. Fepagro Triunfo, armazenadas em AC durante seis meses nas temperaturas de 10, 15 e 20 °C. Quadrados com letras minúsculas e maiúsculas iguais não diferem, respectivamente, entre as temperaturas na mesma condição e entre as mesmas temperaturas nas três condições pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ). \*DMS= Diferença mínima significativa..... 88
- Figura 4b- Perda de massa de sementes, comprimento total de plântulas e massa seca de plântulas de feijão cv. Fepagro Triunfo armazenada em AC durante seis meses nas temperaturas de 10, 15 e 20 °C. Quadrados com letras minúsculas e maiúsculas iguais não diferem, respectivamente, entre as temperaturas na mesma condição e entre as mesmas temperaturas nas três condições pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ). \*DMS= Diferença mínima significativa..... 89
- Figura 5- Atividade das enzimas superóxido dismutase-SOD (a) e guaiacol peroxidase-POD (b) e o conteúdo de peróxido de hidrogênio- $H_2O_2$  (c) de sementes de feijão cv. Fepagro Triunfo armazenadas em AC durante quatro e seis meses nas temperaturas de 10 e 25 °C. Barras com a mesma letra minúsculas e maiúscula não diferem respectivamente entre as condições na mesma temperatura e nas mesmas condições entre temperaturas diferentes pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade de erro. Santa Maria, 2021..... 91
- Figura 6- Atividade das enzimas superóxido dismutase-SOD (a) e guaiacol peroxidase-POD (b) e o conteúdo de peróxido de hidrogênio- $H_2O_2$  (c) de sementes de feijão cv. Fepagro Garapiá armazenadas em AC durante quatro e seis meses nas temperaturas de 10 e 25 °C. Barras com a mesma letra minúsculas e maiúscula não diferem respectivamente entre as condições na mesma temperatura e nas

	mesmas condições entre temperaturas diferentes pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade de erro. Santa Maria, 2021.....	92
Figura 7-	Atividade das enzimas superóxido dismutase-SOD (a) e guaiacol peroxidase-POD (b) e o conteúdo de peróxido de hidrogênio-H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (c) de sementes de feijão cv. Fepagro Triunfo armazenadas em AC durante dois, quatro e seis meses nas temperaturas de 10 e 25 °C. Barras com a mesma letra minúsculas e maiúscula não diferem respectivamente entre as condições na mesma temperatura e nas mesmas condições entre temperaturas diferentes pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade de erro. Santa Maria, 2022.....	93
Figura 8-	Emergência a campo das sementes de feijão das cultivares Fepagro Triunfo (a) e Fepagro Garapiá (b), armazenadas em AC durante seis meses nas temperaturas de 10, 15, 20 e 25 °C. Barras com a mesma letra minúsculas e maiúscula não diferem respectivamente entre as condições na mesma temperatura e nas mesmas condições entre temperaturas diferentes pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade de erro. ....	94
Figura 8c-	Emergência a campo de sementes de feijão cv. Fepagro Triunfo armazenadas em AC durante seis meses nas temperaturas de 10, 15 e 20 °C. Barras com a mesma letra minúsculas e maiúscula não diferem respectivamente entre as condições na mesma temperatura e nas mesmas condições entre temperaturas diferentes pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade de erro. ....	95
Figura 9a-	Altura de plantas de feijão da cv. Fepagro Triunfo em três estágios fenológicos provenientes de sementes armazenadas em AC durante seis meses nas temperaturas de 10, 15, 20 e 25 °C. Barras com a mesma letra minúsculas e maiúscula não diferem respectivamente entre as condições na mesma temperatura e nas mesmas condições entre temperaturas diferentes pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade de erro. ....	96
Figura 9b-	Altura de plantas de feijão da cv. Fepagro Garapiá em três estágios fenológicos provenientes de sementes armazenadas em AC durante seis meses nas temperaturas de 10, 15, 20 e 25 °C. Barras com a mesma letra minúsculas e maiúscula não diferem respectivamente entre as condições na mesma temperatura e nas mesmas condições entre temperaturas diferentes pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade de erro. ....	97
Figura 9c-	Altura de plantas de feijão da cv. Fepagro Triunfo em três estágios fenológicos provenientes de sementes armazenadas em AC durante seis meses nas temperaturas de 10, 15 e 20 °C. Barras com a mesma letra minúsculas e maiúscula não diferem respectivamente entre as condições na mesma temperatura e nas mesmas condições entre temperaturas diferentes pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade de erro. ....	98
Figura 10a-	Índice de área foliar de feijoeiro da cv. Fepagro Triunfo em três estágios fenológicos proveniente de sementes armazenadas em AC durante seis meses nas temperaturas de 10, 15, 20 e 25 °C. Barras com a mesma letra minúsculas e maiúscula não diferem respectivamente entre as condições na mesma temperatura e nas mesmas condições entre temperaturas diferentes pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade de erro. ....	99
Figura 10b-	Índice de área foliar de feijoeiro da cv. Fepagro Garapiá em três estágios fenológicos proveniente de sementes armazenadas em AC durante seis meses nas temperaturas de 10, 15, 20 e 25 °C. Barras com a mesma letra minúsculas e maiúscula não diferem respectivamente entre as condições na mesma temperatura e nas mesmas condições entre temperaturas diferentes pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade de erro. ....	100

- Figura 10c- Índice de área foliar de feijoeiro da cv. Fepagro Triunfo em três estágios fenológicos proveniente de sementes armazenadas em AC durante seis meses nas temperaturas de 10, 15 e 20 °C. Barras com a mesma letra minúsculas e maiúscula não diferem respectivamente entre as condições na mesma temperatura e nas mesmas condições entre temperaturas diferentes pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade de erro. .... 101
- Figura 11a- Produtividade de feijoeiro da cv. Fepagro Triunfo proveniente de sementes armazenadas em AC durante seis meses nas temperaturas de 10, 15, 20 e 25 °C. Barras com a mesma letra minúsculas e maiúscula não diferem respectivamente entre as condições na mesma temperatura e nas mesmas condições entre temperaturas diferentes pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade de erro. .... 102
- Figura 11b- Produtividade de feijoeiro da cv. Fepagro Garapiá proveniente de sementes armazenadas em AC durante seis meses nas temperaturas de 10, 15, 20 e 25 °C. Barras com a mesma letra minúsculas e maiúscula não diferem respectivamente entre as condições na mesma temperatura e nas mesmas condições entre temperaturas diferentes pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade de erro. .... 103
- Figura 11c- Produtividade de feijoeiro da cv. Fepagro Triunfo proveniente de sementes armazenadas em AC durante seis meses nas temperaturas de 10, 15 e 20 °C. Barras com a mesma letra minúsculas e maiúscula não diferem respectivamente entre as condições na mesma temperatura e nas mesmas condições entre temperaturas diferentes pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade de erro. .... 105

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

%	Porcentagem
°C	Temperatura em Graus Celsius
μS	Micro Siemens
AC	Atmosfera Controlada
AF	Área Foliar
CE	Condutividade Elétrica
cm	Centímetro
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
CPA	Comprimento Parte Aérea
CR	Comprimento de Raiz
CTP	Comprimento Total de Plântulas
EC	Emergência a Campo
g	Grama
h	Hora
IAF	Índice de Área Foliar
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Peróxido de Hidrogênio
kg	Quilograma
kPa	Quilo Pascal
L	Litro
M	Molar
ml	Mililitro
N <sub>2</sub>	Nitrogênio

O <sub>2</sub>	Oxigênio
pO <sub>2</sub>	Pressão Parcial de Oxigênio
POD	Guaiacol Peroxidase
SOD	Superóxido Dismutase
TPG	Teste Padrão de Germinação
TA	Teor de Água
UR	Umidade Relativa

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	18
1.2	HIPÓTESES	19
1.3	OBJETIVO GERAL	20
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b>	20
2.1	ASPECTOS CULTURAIS	20
2.2	PARÂMETROS DE QUALIDADE DE SEMENTES	21
2.3	ARMAZENAMENTO	22
<b>2.3.1</b>	<b>Armazenamento Hermético</b>	23
<b>2.3.2</b>	<b>Temperatura</b>	25
<b>2.3.3</b>	<b>Umidade</b>	25
<b>2.3.4</b>	<b>Deterioração de Sementes</b>	27
<b>3</b>	<b>ARTIGO I</b>	29
3.1	IMPACT OF CONTROLLED ATMOSPHERE STORAGE ON THE MAINTENANCE OF SEED PHYSIOLOGICAL QUALITY AND SOYBEAN PRODUCTIVITY	29
3.2	INTRODUCTION	30
3.3	MATERIALS AND METHODS	33
<b>3.3.1</b>	<b>Experimental material and sample preparation</b>	33
<b>3.3.2</b>	<b>Controlled atmosphere establishment and monitoring</b>	34
<b>3.3.3</b>	<b>Water content</b>	35
<b>3.3.4</b>	<b>Mass loss</b>	35
<b>3.3.5</b>	<b>Electrical conductivity</b>	36
<b>3.3.6</b>	<b>Germination test</b>	36
<b>3.3.7</b>	<b>Seedling length and dry mass</b>	36
<b>3.3.8</b>	<b>Hydrogen peroxide content and enzyme activity</b>	36
<b>3.3.9</b>	<b>Experimental plots in the field</b>	38
<b>3.3.10</b>	<b>Seedling emergence in the field</b>	38
<b>3.3.11</b>	<b>Leaf area index</b>	39
<b>3.3.12</b>	<b>Productivity</b>	39
3.4	STATISTICAL ANALYSIS	39
3.5	RESULTS AND DISCUSSION	40
<b>3.5.1</b>	<b>Electrical conductivity</b>	40
<b>3.5.2</b>	<b>Water content</b>	42
<b>3.5.3</b>	<b>Standard germination test</b>	43
<b>3.5.4</b>	<b>Seedling length</b>	44
<b>3.5.5</b>	<b>Dry mass</b>	45

<b>3.5.6 Enzyme activity</b> .....	48
<b>3.5.7 Field emergence</b> .....	51
<b>3.5.8 Plant height</b> .....	53
<b>3.5.9 Leaf area index</b> .....	56
<b>3.5.10 Productivity</b> .....	58
<b>3.6 CONCLUSIONS</b> .....	<b>61</b>
<b>3.7 REFERENCES</b> .....	<b>62</b>
<b>4 ARTIGO II</b> .....	69
<b>4.1 ARMAZENAMENTO EM ATMOSFERA CONTROLADA E EFEITOS NA MANUTENÇÃO DA QUALIDADE FISIOLÓGICA DE SEMENTES E PRODUTIVIDADE DE FEIJÃO</b> .....	69
<b>4.2 INTRODUÇÃO</b> .....	70
<b>4.3 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	72
<b>4.3.1 Material experimental e preparação das amostras</b> .....	72
<b>4.3.2 Estabelecimento e monitoramento da atmosfera controlada</b> .....	73
<b>3.4 VARIÁVEIS ANALISADAS</b> .....	74
<b>3.4.1 Teor de água</b> .....	74
<b>3.4.2 Perda de massa</b> .....	74
<b>3.4.3 Condutividade elétrica</b> .....	74
<b>3.4.4 Teste de germinação</b> .....	75
<b>3.4.5 Comprimento de plântulas e Massa seca de plântulas</b> .....	75
<b>3.4.6 Conteúdo de peróxido de hidrogênio e atividade das enzimas antioxidantes (SOD e POD)</b> .....	75
<b>3.4.7 Parcelas experimentais</b> .....	76
<b>3.4.8 Emergência a campo</b> .....	77
<b>3.4.9 Índice de área foliar</b> .....	77
<b>3.4.9.1 Produtividade</b> .....	77
<b>3.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA</b> .....	77
<b>3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	78
<b>3.5.1 Condutividade elétrica</b> .....	78
<b>3.5.2 Teor de água</b> .....	80
<b>3.5.3 Teste padrão de germinação</b> .....	82
<b>3.5.4 Comprimento de plântulas</b> .....	84
<b>3.5.5 Massa seca</b> .....	86
<b>3.5.6 Atividade enzimática</b> .....	89
<b>3.5.7 Emergência a campo</b> .....	94
<b>3.5.8 Altura de plantas</b> .....	95
<b>3.5.9 Índice de área foliar</b> .....	98

3.6 PRODUTIVIDADE .....	101
<b>4 CONCLUSÕES.....</b>	<b>105</b>
<b>5 REFERÊNCIAS.....</b>	<b>106</b>
<b>6 DISCUSSÃO GERAL .....</b>	<b>111</b>
<b>7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>114</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil está entre os países com maior produção de grãos no mundo. Estima-se que a safra 2023/2024 chegará a 316,7 milhões de toneladas, tornando o setor agrícola ainda mais importante no país (CONAB, 2024). O sucesso de altos índices de produtividade advém de algumas práticas agrícolas, dentre elas está a utilização de sementes de qualidade. As sementes devem apresentar elevado vigor e germinação, principalmente após meses de armazenamento, para que garantam um adequado estabelecimento inicial da cultura semeada. A qualidade da semente é um dos pilares do sistema produtivo de culturas agrícolas, um fator de extrema importância para a obtenção de elevada produtividade, sendo o armazenamento para manter a qualidade fisiológica das sementes (AZEVEDO et al., 2008; SMANIOTTO et al., 2014).

No entanto, em muitas culturas não se faz o uso de sementes de alta qualidade, seja pela utilização de sementes salvas para a semeadura pelo agricultor ou devido à perda do potencial fisiológico das sementes durante o armazenamento em condições não adequadas, aumentando o processo de deterioração das sementes, principalmente em regiões do Centro Oeste, Norte e Nordeste do país, onde as temperaturas médias são mais elevadas, chegando próximas a 30 °C. O inadequado armazenamento de sementes, além de baixar a qualidade fisiológica, diminui seu vigor, o que afeta o estabelecimento adequado das plantas, acarreta desuniformidade das plantas no campo, levando a uma menor produtividade (BAGATELLI et al., 2019).

Existem tecnologias de armazenamento utilizadas por empresas especializadas, para a conservação da qualidade de sementes, como por exemplo o armazenamento em câmaras frigoríficas a qual mantêm a umidade relativa em torno de 60% e a temperatura entre 12 a 20 °C, dependendo da cultura. No entanto, o elevado custo para a manutenção e aquisição de armazéns/câmaras climatizadas encarece o processo de conservação e dificulta que propriedades e empresas de menor porte utilizem esta técnica (ZIEGLER et al., 2021).

Uma técnica de armazenamento bastante estudada e utilizada nos últimos anos, é o armazenamento hermético, principalmente para grãos (BAKHTAVAR, 2020; LUDWIG et al., 2021). Este armazenamento baseia-se na redução do oxigênio (O<sub>2</sub>) no interior da câmara ou silo de armazenamento para níveis letais ou limitantes para os organismos vivos associados às sementes, que pode ser obtido de forma espontânea, através do processo respiratório das sementes/grãos e organismos existentes, ou com a varredura do O<sub>2</sub> com a injeção de nitrogênio (N<sub>2</sub>) no ambiente de armazenamento (ELIAS, 2002). O armazenamento hermético possi-

bilita a redução do O<sub>2</sub> e o aumento da concentração de gás carbônico (CO<sub>2</sub>) pelo processo respiratório da massa de grãos e sementes, propiciando manutenção da qualidade em grãos como por exemplo de feijão-caupi (IBRO et al., 2014; LANE; WOLOSHUK, 2017) e sementes de milho (QUEZADA et al., 2006; COSTA et al., 2010; WILLIAMS et al., 2014). Além disso, o armazenamento hermético diminui variações da umidade relativa do ar intergranular e variações abruptas de temperatura, facilitando o controle da umidade. As sementes armazenadas nesse sistema podem manter sua qualidade devido às condições bióticas do interior dos silos, onde há conversão biológica de O<sub>2</sub> em CO<sub>2</sub> pela respiração, acarretando na diminuição do metabolismo e menor consumo de reservas da semente, possibilitando maior tempo de armazenamento com elevada qualidade (MORENO et al., 2006).

Nos últimos anos, associado ao armazenamento hermético, está sendo estudado o uso da técnica de atmosfera controlada (AC) para o armazenamento de sementes e grãos. Esta técnica se baseia no estabelecimento e controle isolado do oxigênio ou combinado com o CO<sub>2</sub> no interior do ambiente de armazenamento. A combinação de altas concentrações de CO<sub>2</sub>, baixas concentrações de O<sub>2</sub> e umidade relativa adequada pode possibilitar o armazenamento em temperaturas mais elevadas, contribuindo para a manutenção da qualidade física e química de sementes e grãos armazenados (BANKS, 1980; LUDWIG et al., 2020).

As sementes são consideradas como principal insumo no estabelecimento de uma lavoura, que poderá apresentar baixo ou alto desempenho em decorrência de sua qualidade inicial, como altura da planta, índice de área foliar, uniformidade entre outros (BAGATELLI et al., 2019). Informações a respeito da utilização da AC juntamente com diferentes temperaturas são importantes no aperfeiçoamento do armazenamento de sementes, bem como a busca de respostas do desempenho das culturas durante as fases de crescimento e desenvolvimento e sua produtividade.

## 1.2 HIPÓTESES

- a) A diminuição de O<sub>2</sub> e/ou aumento de CO<sub>2</sub> no ambiente de armazenamento permite manter elevado vigor e a germinação em sementes de feijão e soja, após seis meses de armazenamento em temperaturas de 10, 15, 20 e 25 °C, levando a uma maior produtividade de grãos em relação à condição Ambiente de armazenamento.
- b) O efeito dos níveis de O<sub>2</sub> e de CO<sub>2</sub> na atmosfera de armazenamento varia sobre a qualidade fisiológica de sementes de feijão e soja em função da temperatura de armazenamento.

### 1.3 OBJETIVO GERAL

Avaliar o efeito de condições de atmosfera controlada em diferentes temperaturas sobre a manutenção da qualidade fisiológica da semente e sua produtividade a campo, após seis meses de armazenamento das sementes de feijão e soja.

### 1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Avaliar a baixa concentração de O<sub>2</sub> isolada ou combinada com alto nível de CO<sub>2</sub> na manutenção da qualidade fisiológica de sementes de feijão e soja em diferentes temperaturas durante o armazenamento.
- b) Avaliar a produtividade de grãos a campo de sementes de feijão e soja armazenadas em diferentes condições de atmosfera controlada e temperaturas.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 ASPECTOS CULTURAIS

A cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) apresenta uma elevada representatividade na produção de grãos, sendo uma cultura de elevada importância no cenário agrícola brasileiro e mundial. De acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2023), o Brasil é o terceiro maior produtor mundial de feijão. A safra brasileira em 2022/2023 foi de cerca de 3,0 milhões de toneladas, cuja produção é inferior apenas a de Mianmar e Índia, que apresentam uma produção de 5,8 e 5,3 milhões de toneladas, respectivamente. Além disso, a população brasileira consome cerca de 17 kg per capita de feijão por ano, o que torna o Brasil um dos países de maior consumo e produção mundial (CONAB, 2023).

Outra cultura de destaque é a cultura da soja (*Glycine max* L. Merrill), que na safra 2022/2023 alcançou 150 milhões de toneladas. O Brasil atualmente é o país que detém a maior produtividade em nível mundial, possuindo uma área de pouco mais de 42,4 milhões de hectares destinados à cultura (CONAB, 2023). A soja é uma importante fonte de proteína e óleo, usada para alimentação humana e na formulação de rações para a alimentação animal. A proteína de soja possui qualidade semelhante a produtos de origem animal, devido à presença de aminoácidos essenciais para alimentação humana (SOUZA et al., 2010). A partir disso, a soja é amplamente explorada industrialmente para confecção de alimentos como proteína,

leite, farinha dentre outros e, também, como fonte de energia renovável, quando utilizado na fabricação de biodiesel (ÁVILA et al., 2012).

Um dos principais entraves para o aumento da produção dos grãos é a falta de logística e infraestrutura no sistema de armazenagem (AZEVEDO et al., 2008; SILVA et al., 2016), havendo dificuldades de escoamento da safra, bem como a manutenção do produto em ambientes adequados, sem que fatores bióticos e abióticos ocasionem perdas após a colheita. A capacidade de armazenamento da produção de grãos no Brasil é de cerca de 201,6 milhões de toneladas, ficando abaixo da capacidade mínima de armazenamento, que deveria suportar 20% além do que é produzido durante uma safra de grãos (AZEVEDO et al., 2008). A dificuldade de escoar a produção e a falta de unidades para armazenamento, leva o produtor a utilizar formas de armazenamento inadequadas, como manter os grãos a céu aberto ou em armazéns sem controle de umidade relativa do ar e temperatura. A manutenção de uma alta germinação de sementes é outro desafio quando não realizado o controle da temperatura e umidade relativa, potencializando as perdas em regiões do Brasil onde a temperatura ambiente é muito alta, como no Centro-oeste e Norte.

## 2.2 PARÂMETROS DE QUALIDADE DE SEMENTES

Um dos fatores de maior importância para se obter elevadas produtividades é o uso de sementes de alta qualidade na implantação da lavoura. A produção de sementes para a semeadura das culturas como soja e feijão chega a 3,7 milhões de toneladas anualmente, quantidade expressiva de sementes, as quais auxiliam no sucesso de produção dessas culturas. Entretanto, a utilização de sementes certificadas em relação à área semeada corresponde a cerca de 67% para a cultura da soja e 18% para a cultura do feijão, o que abre lacunas e surge como desafio para potencializar a produção nacional (ABRASEM, 2023).

A qualidade das sementes está relacionada com parâmetros físicos, genéticos, fisiológicos e sanitários. A qualidade genética da semente deve ser garantida no campo e, para que as características sejam repassadas para a próxima geração, não pode haver a contaminação varietal (PESKE, 2019). Determinante na colheita, no beneficiamento e armazenamento, o teor de água nas sementes influencia os processos metabólicos, retardando ou acelerando-os. Além disso, danos mecânicos e infecções por patógenos também influenciam a qualidade de sementes, refletindo diretamente no estande de plantas e produtividade, onde a baixa sanidade da semente afeta negativamente a qualidade fisiológica, bem como a sanidade das plântulas devido à infecção com diversos fungos (KRZYANOWSKI et al., 2008). Rajjou et al. (2011)

relataram que a semente com alto vigor é aquela capaz de germinar na maior amplitude possível de fatores do ambiente. O alto vigor da semente é importante para diminuir os riscos de não ocorrer germinação satisfatória, quando as condições do meio são desfavoráveis.

A composição física de um lote traz informações sobre sua pureza, representado pelo grau de contaminação existente com demais sementes daninhas nocivas toleradas. Além disso, o teor de água contido na semente é um fator de grande importância, pois influencia processos metabólicos e definem ações que devem ser tomadas desde a colheita até o armazenamento. O beneficiamento é um processo fundamental e importante fisicamente para a semente, pois nesse processo podem ocorrer danos que afetam, posteriormente, seu vigor e germinação, parâmetros cruciais para a qualidade das sementes (POPINIGIS, 1985).

Santos et al. (2005) afirmam que a qualidade fisiológica se expressa pela capacidade máxima de germinar e formar plântulas normais, sendo o teste de germinação essencial para comparar lotes e a qualidade de sementes. A germinação ocorre quando as sementes são viáveis, não dormentes e as condições ambientais são favoráveis (CARVALHO; NAKAGAWA, 2012). Rajjou et al. (2011) definiram germinação como uma sequência de atividades metabólicas divididas em fases que resulta na formação de uma plântula. A germinação é dividida em três fases: fase de embebição (fase 1) definida pela reativação da respiração e retomada do metabolismo primário; fase de indução do crescimento (fase 2), quando a semente diminui a absorção de água e prepara o aparato bioquímico para a síntese de novas moléculas e a fase de retomada de crescimento (fase 3), ocorrendo a assimilação de substâncias de reserva e a semente retorna a absorver água, culminando com a emissão da radícula e crescimento do embrião (BORGHETTI, 2004; POPINIGIS, 1985). A temperatura, tamanho da semente e permeabilidade do tegumento, entre outros fatores, influenciam na velocidade de absorção de água e reações químicas determinantes para a duração de cada fase do processo de germinação (CARVALHO; NAKAGAWA, 2000).

### 2.3 ARMAZENAMENTO

O armazenamento é uma das principais etapas do setor do agronegócio, que possibilita a regulação de mercado, suprindo gargalos de abastecimento e condicionando lucratividade na oferta de grãos e sementes em períodos estratégicos a produtores e empresas em âmbito nacional e internacional (ZIEGLER et al., 2016). Existem vários métodos utilizados no armazenamento de sementes, desde sacarias, método muito utilizado em armazéns convencionais, até câmaras climatizadas, onde há o controle de temperatura e umidade relativa do ar. Não só

para sementes, mas para grãos também há outros métodos de armazenamento, dentre eles pode-se citar o armazenamento em silos, que são unidades armazenadoras podendo a matéria-prima ser alocada em compartimentos herméticos ou semi-herméticos. Para Puzzi et al. (2000) e Ziegler et al. (2016), os tipos de silos podem ser denominados quanto às suas características estruturais e operacionais tendo como exemplo: silos elevados de concreto; silos metálicos; silos horizontais; silo bolsa/bag entre outros.

O armazenamento é fundamental para garantir estabilidade e reduzir a elevação de preço e manter a qualidade durante a entressafra de vários produtos agrícolas, como o feijão, que necessita manter as condições físico-químicas, como baixo tempo de cozimento e manutenção da coloração do tegumento durante um longo período após a colheita. Além disso, o armazenamento, quando realizado de forma eficaz, possibilita o controle de fungos, que causam perdas qualitativas e quantitativas. Diversos fungos produzem toxinas, podendo causar intoxicação para animais que consomem rações e outros subprodutos derivados de grãos contaminados com micotoxinas, metabólitos secundários produzidos por fungos, que se desenvolveram durante o armazenamento.

Somado a isso, o armazenamento tem como objetivo promover a máxima manutenção dos parâmetros de qualidade da semente colhida no momento da maturidade fisiológica (KONG; CHANG, 2013). Por ser um organismo vivo, a semente necessita de diversos cuidados especiais para preservar sua capacidade de germinação e seu vigor, sendo que muitos procedimentos são realizados no armazenamento.

### **2.3.1 Armazenamento Hermético**

Segundo Vieira e Yokoyama (2000), umidade da semente/grão superior a 14% durante o armazenamento resulta em um aumento da atividade enzimática e respiratória, favorecendo o desenvolvimento de fungos, que são favorecidos pela elevada temperatura, culminando na deterioração da semente. A deterioração da semente está relacionada com a alteração ou perda da integridade das membranas celulares, acarretando a redução do vigor.

Uma técnica de armazenamento que está aumentando seu uso nos últimos anos, é o armazenamento hermético de grãos e sementes. Este armazenamento baseia-se na redução do  $O_2$  disponível no interior da atmosfera, em níveis letais ou limitantes para os organismos vivos associados às sementes, podendo ser obtida espontaneamente através do processo respiratório dos grãos e organismos existentes, ou com a varredura do  $O_2$ , através da injeção de  $N_2$  no ambiente de armazenamento (ELIAS, 2002).

O armazenamento hermético pode se dar em estruturas que apresentam elevada estanqueidade. Em vários países encontramos este tipo de estrutura que possuem essas características como silos metálicos e silos bolsa, que têm o objetivo de manter da qualidade física e estocagem do excedente do produto colhido, que fica suscetível a variações climáticas (GASTÓN et al., 2009; RIDLEY et al., 2011; BARTOSIK, 2012; RODRIGUEZ et al., 2019). Devido à possibilidade de controle e mensuração da concentração dos gases nos silos herméticos, a técnica de atmosfera controlada (AC) pode ser aplicada nesses tipos de silos. O armazenamento em AC baseia-se no controle de pressões parciais de O<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub> e da umidade relativa com o intuito de manter as características físicas e químicas dos produtos armazenados. Goodesell et al. (1955) relataram que o armazenamento de sementes de milho com concentrações baixas de O<sub>2</sub>, apresentam maior germinação em comparação com outras técnicas, como a atmosfera modificada, em que o nível dos gases não é controlado. Além disso, algumas cultivares de feijão carioca mantiveram maior germinação, menor escurecimento do tegumento, além de baixo tempo de cozimento, em baixa concentração de O<sub>2</sub> (1,5 kPa) com associação à baixa temperatura (0,5 °C), quando comparado com o armazenamento em temperatura e ar ambiente (NEUWALD et al., 1999). Linke (2014) relata que o armazenamento de sementes de soja com concentrações baixas de O<sub>2</sub> apresenta maior germinação em relação com outras técnicas. Além disso, o feijão carioca manteve maior germinação, menor escurecimento do tegumento, além de baixo tempo de cozimento, quando armazenado em baixa concentração de O<sub>2</sub> (1,0 kPa), principalmente quando associada à temperatura de 20 °C comparado ao armazenamento em temperaturas de 25 e 30 °C em ar ambiente (BERGHETTI, 2020).

O armazenamento hermético possibilita a redução do O<sub>2</sub> e o aumento da concentração de CO<sub>2</sub> pelo processo respiratório da massa de sementes, possibilitando manutenção da qualidade em grãos de feijão-caupi, sementes de milho (COSTA et al., 2010; NOOR et al., 2011; IBRO et al., 2014; WILLIAMS et al., 2014; LANE; WOLOSHUK, 2017) e grãos e sementes de soja (BARTOSIK et al., 2008; OCHANDIO et al., 2017; LUDWIG et al., 2021a; LUDWIG et al., 2021b). Além disso, previne a infestação de insetos que causam elevadas perdas na cultura do milho e feijão, principalmente pelo caruncho *Sitophilus zeamais* e *Acanthoscelides obtectus* (FARONI; SILVA, 2008; MORAES et al., 2011; FREITAS et al., 2016).

A atmosfera controlada com níveis baixos de oxigênio e elevados níveis de gás carbônico se mostraram benéficas na manutenção destes atributos físicos e fisiológicos. Entretanto, são necessárias informações complementares sobre a importância do armazenamento com AC, tanto durante o armazenamento, quanto no período posterior, a fim de ser verificada resposta das sementes a campo.

### 2.3.2 Temperatura

Um dos principais motivos para se estudar diferentes temperaturas ao longo do armazenamento de sementes e grãos, é verificar, dentre diversas temperaturas, se há a manutenção da qualidade prévia do material armazenado, tanto em parâmetros fisiológicos como também físico-químicos ao longo do período de armazenamento e posterior a ele.

A temperatura de armazenamento é considerada um dos fatores-chave que atuam na velocidade e intensidade de perdas da qualidade de sementes e grãos de feijão (SARTORI, 1996). Segundo Paraginski et al. (2015), as culturas de milho e arroz após a colheita têm grande parte de suas perdas devido à utilização de uma temperatura elevada durante o armazenamento, agindo negativamente na qualidade dos grãos e sementes dessas culturas.

A temperatura dos grãos influencia diretamente a velocidade de reações químicas e metabólicas, onde as reservas contidas nos tecidos são transportadas e transformadas com maior ou menor velocidade, dependendo da temperatura de armazenamento (AGUIAR et al., 2015). O controle de temperatura tem o objetivo de manter a qualidade inicial de sementes e grãos, onde o resfriamento artificial, em ambientes não herméticos, como também em ambientes herméticos sem o uso da refrigeração, tem sido o alvo de estudos e ganhando mais ênfase na pesquisa visando suprir perdas em pós-colheita.

Temperaturas elevadas durante o armazenamento, quando associadas a elevados teores de umidade relativa do ar aceleram o processo de deterioração das sementes, que eventualmente podem levar à perda da capacidade de germinação. Os principais processos relacionados à deterioração das sementes são: esgotamento das reservas; alteração da composição química; alterações das membranas celulares e alterações genéticas e de nucleotídeos (DELOUCHE, 1979; PESKE, 2019). Além disso, esses processos podem ser mais intensos quando as sementes estão sob elevadas temperaturas e teores de água, além disso, fatores ambientais como clima, nutrição e presença de insetos também afetam a deterioração das sementes (PESKE, 2019).

De acordo com o exposto, a tecnologia de armazenamento hermético com atmosfera controlada em silos bolsa, é uma técnica promissora que deve ser estudada para o armazenamento de sementes de feijão e soja produzidas nas condições climáticas brasileiras.

### 2.3.3 Umidade

O teor de água das sementes é um fator de suma importância desde o período que antecede a colheita até a comercialização. A semente possui uma característica após sua colheita que é de regular seu teor de água a partir de condições de temperatura e umidade relativa do ambiente de armazenamento, chamado de umidade de equilíbrio (UE) (SCHULTZ et al., 2017; CORRÊA et al., 2018).

O alto teor de água durante o armazenamento é um dos fatores que mais influenciam a perda de qualidade ou aumento da deterioração das sementes. Teores acima de 12% favorecem o aumento da taxa respiratória, ataque de fungos e insetos. Em ambientes não herméticos de armazenamento, a semente está mais sujeita a variações de seu equilíbrio higroscópico em função de oscilações de umidade relativa (UR) e temperatura, que ocorrem mais intensamente (RUPOLLO et al., 2006; CASSOL et al., 2012).

Em sistemas herméticos de armazenamento, as variações de temperaturas e umidade relativa são consideradas baixas devido à existência da barreira física entre as condições ambientais e atmosféricas internas e externas dos silos, sistemas que têm apresentado efeito no equilíbrio higroscópico da semente e, conseqüentemente, menores alterações no teor de água no momento inicial até o momento final de armazenamento (ZEYMER et al., 2018).

A UE é dependente de fatores como UR e principalmente, temperatura. Em sistemas herméticos é possível notar que com o aumento da temperatura há uma diminuição da UE quando não há variação da UR, devido ao fato de não haver trocas significativas durante o armazenamento, sendo que, quanto maior a UR inicial do sistema maior será a UE de momento inicial sob uma determinada temperatura. A literatura destaca que em ambientes herméticos a UE tem um percentual pouco acima do teor de água da semente, porém muito próximos, sem muitas variações, o que tem relação com a pressão de vapor de água no meio intergranular e a pressão de vapor nas sementes armazenadas, que ficam estáveis pela baixa variação de umidade ao longo do armazenamento. Quando alterada, tanto a temperatura quanto a umidade relativa, há, então, alterações na pressão de vapor e, conseqüentemente, na UE no armazenamento (RUPOLLO et al., 2006; BARTOSICK et al., 2008; ZEYMER et al., 2017).

Em sistemas não herméticos essas relações ocorrem de forma semelhante aos de sistemas herméticos, podendo, entretanto, acrescentar alguns pontos. Em sistemas não herméticos a necessidade de monitoramento da UR e temperatura se tornam fatores decisivos, principalmente por estas variáveis oscilarem ao longo do período de armazenamento de forma mais abrupta. É possível notar que no aumento da temperatura há então diminuição da umidade relativa devido a maior necessidade de vapor de água para saturar o ar ambiente.

Além disso, o aumento da temperatura e umidade relativa favorecem o processo de deterioração das sementes, principalmente pela ativação do metabolismo fisiológico, acarretando aumento da respiração, expressa no aumento na produção de CO<sub>2</sub>, podendo ser ainda maior quanto maior for o teor de água das sementes e/ou maior UE (BARTOSICK et al., 2012; ZEYMER et al., 2018).

### 2.3.4 Deterioração de Sementes

A deterioração da semente tem início logo após a maturidade fisiológica e é um processo inevitável, podendo ser acelerado ou retardado devido a processos de natureza física e fisiológica que ocorrem durante o beneficiamento e armazenamento até a semeadura. Os primeiros sinais de deterioração estão relacionados com perda ou alteração da integridade das membranas celulares, reduzindo inicialmente o vigor e, posteriormente, a germinação (DELOUCHE; BASKIN, 1973; MARCOS FILHO, 2005). Além da redução do poder germinativo, a formação de plântulas anormais e de menor tamanho são indicativos de deterioração das sementes. Essas alterações podem ser agravadas durante o armazenamento devido ao ambiente que afeta a habilidade de sobrevivência e de gerar uma planta vigorosa (JYIOTI; MALIK, 2013).

Outra forma de se avaliar as transformações degenerativas das sementes é determinação da atividade enzimática. Destaca-se como alterações enzimáticas mais frequentes no processo de deterioração: as alterações na estrutura das enzimas; a inativação progressiva de enzimas; a redução ou paralisação da síntese de enzimas; a menor atividade de enzimas respiratórias e deformações no processo de síntese, acarretando problemas na divisão e alongamento celular e respiração (PESKE, 2006).

Durante o armazenamento pode haver alterações nos sistemas enzimáticos desfazendo a homeostase celular levando ao estresse oxidativo ou a geração de espécies reativas de oxigênio (EROs). As EROs são produzidas em todos os organismos e estão normalmente em equilíbrio com moléculas antioxidantes (SCANDALIOS, 2002). Quando plantas sofrem estresse oxidativo, diferentes vias são afetadas e os elétrons com altos níveis de energia são transferidos para o oxigênio molecular formando EROs, tais como superóxido, peróxido de hidrogênio e radical hidroxila.

O peróxido de hidrogênio (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) é gerado a partir da dismutação do superóxido, que é abundante nos sistemas biológicos tendo sua produção aumentada em resposta a estresses abióticos e bióticos. Entretanto, o H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> não é apenas um sinalizador de estresse celular, mas

também induz a expressão de genes que codificam proteínas relacionadas ao metabolismo e defesa celular. Em suma, o  $H_2O_2$  atua como um sinalizador a respostas de estímulos das células vegetais sendo responsivo à tolerância a diversos estresses em baixas concentrações e, podendo levar a célula a morte, quando em elevadas concentrações. Entretanto, as células possuem componentes de defesas antioxidantes, que têm por função remover espécies reativas de oxigênio (ERO) das células. As EROs são moléculas que afetam a integridade de membranas causando danos às células por exemplo. Desse modo, o acúmulo de EROs pode resultar em prejuízos consideráveis, necessitando a célula dispor de vários mecanismos para detoxificar eficientemente essas moléculas.

Os componentes enzimáticos são enzimas reguladoras que impedem a ação tóxica das EROs à célula vegetal. São elas: superóxido dismutase (SOD), ascorbato peroxidase (APx), catalase (CAT), glutathiona peroxidase (GPx) e peroxiredoxina (PrxR) (SCANDALIOS, 2002; MITTLER et al., 2004). A enzima SOD é a responsável por detoxificar o superóxido, produzindo o peróxido de hidrogênio e este pode ser eliminado pelas demais enzimas antioxidantes. Sendo assim, o balanço entre a concentração de SOD e a concentração das enzimas detoxificadoras de peróxido de hidrogênio é crucial para manter o equilíbrio entre os níveis de superóxido e peróxido de hidrogênio na célula (MITTLER et al., 2017).

Condições de armazenamento alteram a velocidade da deterioração, a modificação na concentração gasosa no ambiente retarda o processo de deterioração. Em sementes armazenadas em condições não controladas, ocorre queda de atividade dos sistemas isoenzimáticos, principalmente após longos períodos de armazenamento, podendo ser reduzidas quando o armazenamento é realizado em câmaras frigoríficas com baixa umidade relativa, essas atividades são mantidas (PESKE, 2019; CARVALHO et al., 2014).

Quando condições adequadas de armazenamento são utilizadas, o reestabelecimento da atividade celular pode ser garantido como a respiração celular, eficiência de mitocôndrias durante a embebição no processo de germinação, reversão de danos ocorridos durante o beneficiamento, síntese de RNAm, culminando com elevado potencial de vigor e germinação. (HE et al., 2011; VIEIRA et al., 2013). Com isso, é de suma importância conhecer e avaliar a atividade enzimática e, conseqüentemente, quantificar sua importância na manutenção da qualidade fisiológica de sementes armazenadas sob diferentes condições de armazenamento.

### 3. ARTIGO I

#### 3.1 IMPACT OF CONTROLLED ATMOSPHERE STORAGE ON THE MAINTENANCE OF SEED PHYSIOLOGICAL QUALITY AND SOYBEAN PRODUCTIVITY

Magno Roberto Pasquetti Berghetti\*, Vagner Ludwig<sup>a</sup>, Lucas Malmann Wendt<sup>a</sup>, Francis Júnior Soldateli<sup>a</sup>, Flavio Roberto Thewes<sup>a</sup>; Fabiane Potella Rosato<sup>a</sup>; Liege Camargo da Costa<sup>a</sup>, Luciane Akmeri Tabaldi<sup>b</sup> and Auri Brackmann<sup>a</sup>

\***Corresponding author:** magno.pasquetti@gmail.com

<sup>a</sup>Departamento de Fitotecnia, Núcleo de Pesquisa em Pós-colheita, Universidade federal de Santa Maria, Avenida Roraima nº 1000, CEP: 97105-900 RS, Brazil;

<sup>b</sup>Departamento de Biologia, Centro de Ciências Naturais e Exatas, Universidade federal de Santa Maria, Avenida Roraima nº 1000, CEP: 97105-900 RS, Brazil.

#### **Abstract**

Soybean is a key commodity produced in Brazil, and contributes to income and development of many countries. Ensuring high-quality seeds is a critical factor in achieving exceptional productivity levels. Proper seed storage is crucial for maintaining this quality, thereby facilitating robust plant establishment in the fields. Therefore, this study sought to investigate the efficacy of hermetic silos coupled with controlled atmospheres to extend quality of seeds. This study evaluated the influence of low partial oxygen, high carbon dioxide pressures and four storage temperatures (10, 15, 20, and 25 °C), on the physiological soybean quality seeds and subsequent crop yield. For the 2020/2021 season, soybeans seeds of NA 5909 RR cultivar, were stored for six months under the following conditions: [1] ambient, [2] 1.0 kPa O<sub>2</sub> + 0.04 kPa CO<sub>2</sub>, and [3] 1.0 kPa O<sub>2</sub> + 15.0 kPa CO<sub>2</sub> at 10, 15, 20, and 25 °C. In the 2021/2022 season, the conditions tested were: [1] ambient, [2] 1.0 kPa O<sub>2</sub> + 0.0 kPa CO<sub>2</sub>, [3] 3.0 kPa O<sub>2</sub> + 0.0 kPa CO<sub>2</sub>, and [4] 5.0 kPa O<sub>2</sub> + 0.0 kPa CO<sub>2</sub> at three temperatures (10, 15, and 20 °C). Water content, electrical conductivity, standard germination tests, seedling length and dry mass, hydrogen peroxide content, superoxide dismutase and guaiacol peroxidase

activities were evaluated. After storage, the seeds were evaluated for field emergence, plant height, leaf area index, and yield. Throughout the two years, seeds stored at 10 °C under 1.0 kPa O<sub>2</sub> show superior physiological quality in the assessed variables. In general, these condition ( 1.0 kPa O<sub>2</sub> + 10°C) increased field productivity, ranging from 82.0 to 421.0 kg ha<sup>-1</sup> compared to Ambient conditions and 268.7 to 978.0 kg ha<sup>-1</sup> compared to seeds stored under other temperature conditions. High carbon dioxide pressures did not provide any additive benefit to low partial oxygen pressures in preserving the seeds physiological quality after storage. All CA storage conditions maintained superior physiological quality of seeds after six months of storage, guaranteeing greater productivity, especially at low temperatures of 10 and 15 °C.

**Keywords:** Deterioration, grain yield, postharvest technology, *Glycine max* L.

### 3.2 INTRODUCTION

The 2022/2023 soybean crop is projected to surpass 150 million tons, solidifying Brazil's position as the world's leading producer of this grain (CONAB, 2022). This production milestone is attributable to a confluence of factors, including improved soil preparation, effective plant health management, high-yield cultivars, timely sowing, and quality seeds. After harvest, storage these seeds under optimal conditions to maintain their quality is essential. Factors such as temperature and relative humidity are critical and require fine-tuning to minimize loss of seed vitality. Research focusing on seed storage and physiological quality is essential, given that seed quality is a pivotal factor in plant establishment, development, and yield (Tavares et al., 2013; Bagateli et al., 2019).

Among various storage methods, hermetic storage stands out for its beneficial properties, and it has been studied and applied globally to mitigate grain quality degradation

(Kong and Chang, 2013; Silva et al., 2018; Yahaya et al., 2022). This storage method approach minimizes internal humidity fluctuations within silos, thereby offering better control over this variable (Alencar et al., 2010; Bakhtavar, 2020; Silva et al., 2018; Ludwig et al., 2021a). One of the advantages of hermetic storage is its ability to modify and control the internal silo atmosphere, which involves reducing available of O<sub>2</sub> levels which is lethal or restrictive for the development of organisms associated with the seeds. This can be achieved naturally through grain and organism respiration or artificially by flushing out O<sub>2</sub> through N<sub>2</sub> injection (Ziegler et al., 2021). Additionally, reducing O<sub>2</sub> levels and increasing CO<sub>2</sub> concentrations maintain the grain quality, including beans (Brackmann et al., 2002; Elias, 2002; Ibro et al., 2014; Franco, 2015; Lane & Woloshuk, 2017; Berghetti, 2020), soybean seeds (Ludwig et al., 2021a, 2021b), and corn (Quezada et al., 2006; Costa et al., 2010; Williams et al., 2014).

Hermetic storage allows for atmosphere control, which has shown promise in preserving the physicochemical attributes of grains and seed physiology (Ludwig et al., 2021a, 2021b). Controlled atmospheres with low O<sub>2</sub> and high CO<sub>2</sub> levels have demonstrated benefits such as maintaining seed coat color in light-colored bean cultivars and shorter cooking times (Brackmann et al., 2002), preserving soybean oil quality (Ludwig et al., 2021b), and sustaining the physiological quality of corn and soybean seeds (Groot et al., 2015; Ochandio et al., 2017; Silva et al., 2021; Ludwig et al., 2021a, 2021b).

Controlled atmosphere (CA) storage, particularly effective at 25 °C and below, can complement hermetic systems, benefiting producers and companies (Freitas et al., 2016; Ludwig et al., 2021). However, it remains to be verified whether the advantageous CA storage effect on seed quality persists after sowing on the plant growth and yield following CA storage at different temperatures. During storage, enzymatic systems may undergo alterations, disrupting cellular homeostasis and leading to oxidative stress or generating reactive oxygen

species (ROS) (Peske et al., 2019). Common enzymatic changes during deterioration include enzyme structure modification, progressive enzyme inactivation, reduced or halted enzyme synthesis, diminished respiratory enzyme activity, and altered cellular synthesis, division, and elongation processes (Peske et al., 2019). Moreover, ROS are universally produced in organisms and typically counterbalanced by antioxidants (Scandalios, 2002).

Among ROS, hydrogen peroxide ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) stands out; it arises from the dismutation of the superoxide anion, which is prevalent in biological systems, and its production escalates under cellular stress. The enzyme superoxide dismutase (SOD) is a primary cellular defense against stress, converting the superoxide anion ( $\text{O}_2^{\cdot-}$ ) into  $\text{H}_2\text{O}_2$ , therefore maintaining a balance between SOD and  $\text{H}_2\text{O}_2$ -detoxifying enzymes is vital (Mittler, 2017). Guaiacol peroxidase (POD) is another enzyme with a role in ROS and  $\text{H}_2\text{O}_2$  reduction and is active in various cellular compartments in mitigating biotic and abiotic stresses.

Storage conditions impact seed deterioration, and alterations in environmental gas concentrations can decelerate this process. In uncontrolled conditions, long-term storage leads to decreased isoenzyme system activity, albeit this can be mitigated through cold, dry storage (Peske et al., 2019; Carvalho et al., 2014). Therefore, combining CA conditions with low  $\text{O}_2$  and high  $\text{CO}_2$  levels at different temperatures can slow deterioration and preserve seed quality.

Given this background, this study aimed to assess the effects of low  $\text{O}_2$  pressures, either standalone or combined with high  $\text{CO}_2$  partial pressures at three temperatures, on the physiological quality of stored soybean seeds over six months and their impact on field productivity.

### 3.3 MATERIALS AND METHODS

#### 3.3.1 Experimental material and sample preparation

The seed storage experiments were conducted at the Postharvest Research Center (NPP) of the Federal University of Santa Maria (UFSM) in southern Brazil. Soybean seeds (NA 5909 RR cultivar) were used for the years 2020–2021 (year 1) and 2021–2022 (year 2). These seeds were provided by the Department of Agricultural Diagnosis and Research (DDPA)/Seed Research Center in Júlio de Castilhos/RS (Figure 1). After seed storage, experimental plots were established and managed at the DDPA. The regional climate is classified as Cfa according to the Köppen system, featuring an altitude of roughly 500 m, an annual rainfall of 1450–1650 mm, and an annual temperature range of 12–25 °C. Upon arrival at the NPP, the seeds' moisture content was determined, and batches with moisture content above 12.0% were subjected to forced-air drying until reaching approximately 11.5% moisture content. After drying, each experimental sample, consisting of 1.0 kg of seeds, was weighed.

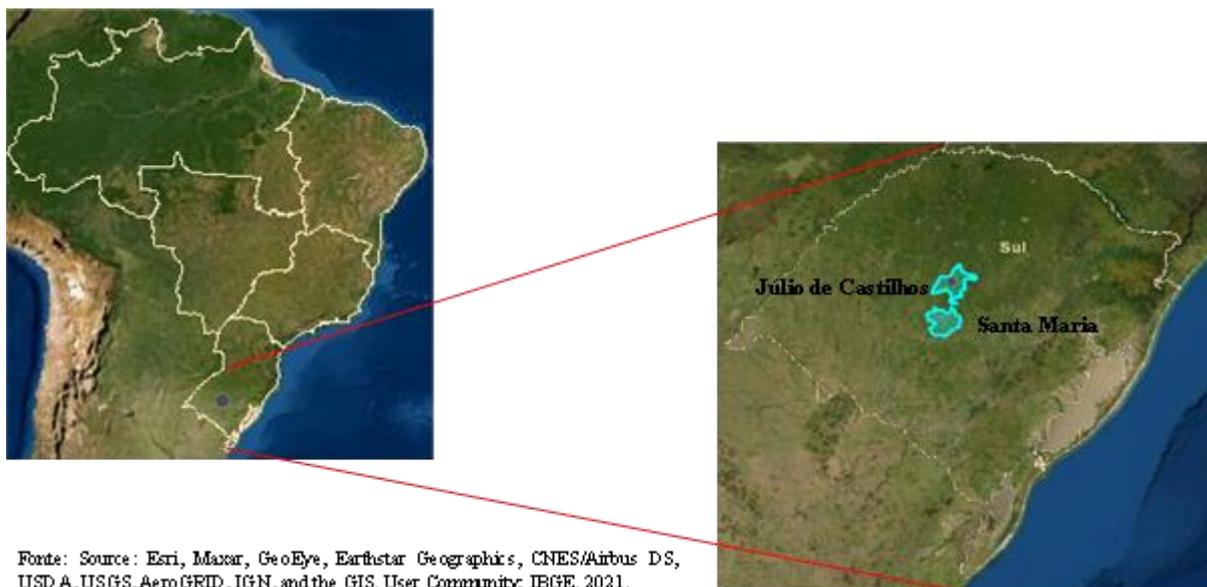


Figure 1- Experimental localization map, cities of Santa Maria and Julio de Castilhos-RS, Brazil, 2021.

### 3.3.2 Controlled atmosphere establishment and monitoring

The seeds were stored in 24-L hermetic metal silos. The specific atmospheric conditions were achieved by reducing the partial oxygen pressure ( $O_2$ ) by injecting nitrogen from a nitrogen generator operating on the pressure swing adsorption principle. The partial pressure of  $CO_2$  was established by injecting gas from a high-pressure  $CO_2$  cylinder. The gases partial pressures were adjusted and measured in the silos twice weekly using a Siemens Ultramat-23 gas analyzer (Figure 2). The silos were housed in climate-controlled chambers with temperatures maintained automatically by electronic thermostats and monitored daily with mercury thermometers. During the first year, the temperature settings were 10, 15, 20, and 25 °C, and 10, 15, and 20 °C in the second year. The seeds were stored for six months under following atmospheric conditions: 20.9 kPa  $O_2$  + 0.04 kPa  $CO_2$ , 1.0 kPa  $O_2$  + 0.04 kPa  $CO_2$ , and 1.0 kPa  $O_2$  + 15.0 kPa  $CO_2$  for first year and 20.9 kPa  $O_2$  + 0.04 kPa  $CO_2$ , 1.0 kPa  $O_2$  + 0.04 kPa  $CO_2$ , 3.0 kPa  $O_2$  + 0.04 kPa  $CO_2$ , and 5.0 kPa  $O_2$  + 0.04 kPa  $CO_2$  for second year.

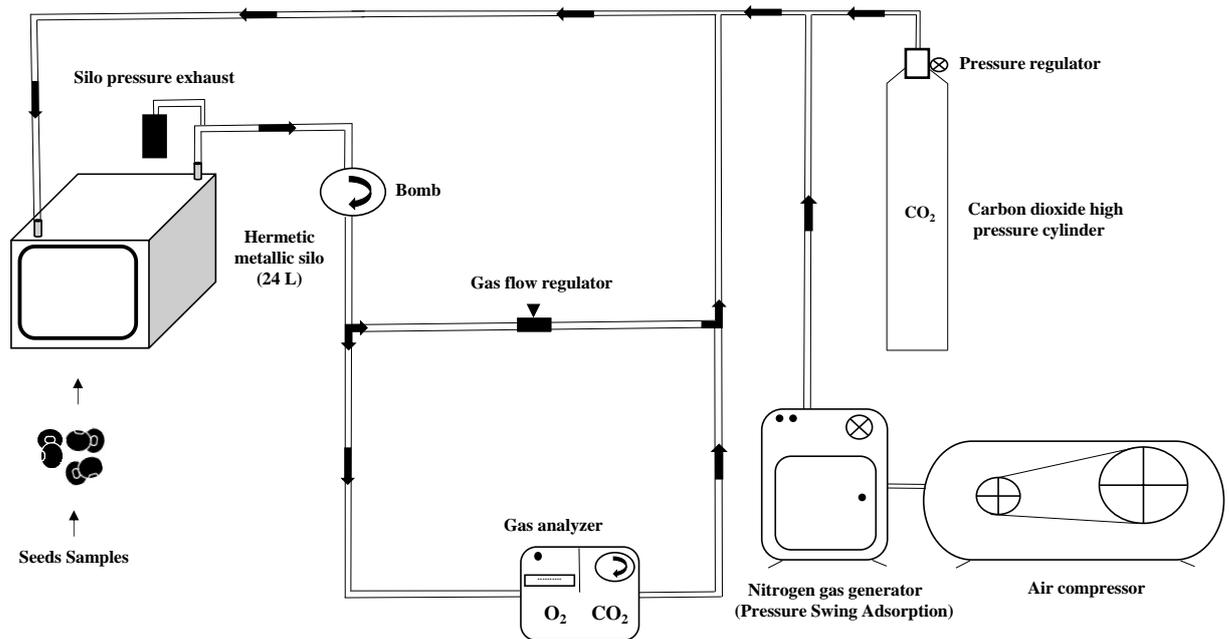


Figure 2- Installation scheme of the atmosphere (O<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub>) through the nitrogen generator and high-pressure cylinder of carbonic gas, Santa Maria, 2023.

### 3.3.3 Water content

The seeds' water content was performed using a calibrated moisture meter (GEHAKA® G600). Based on four replications, the equipment determined the moisture content of a known weight of the samples. The resulting values were expressed as a percentage (Brasil, 2009).

### 3.3.4 Mass loss

Mass loss was assessed in the second year by weighing the 1.0 kg experimental samples. These samples were weighed bi-monthly until the end of the storage period. The final mass loss, expressed in grams, was then determined (Brasil, 2009).

### **3.3.5 Electrical conductivity**

Electrical conductivity was determined using four replicates of 50 seeds each. These seeds were weighed and placed in 200 mL plastic cups containing 75 mL of distilled water. After incubation in an air-conditioned chamber at  $25 \pm 1.0$  °C for 24 h, the electrical conductivity of the water was measured using a digital conductivity meter (ASKO® EC Basic AK51-CHINA). Data were expressed in  $\mu\text{S cm}^{-1} \text{g}^{-1}$  of seed (Brasil, 2009).

### **3.3.6 Germination test**

Germination tests were conducted with four replicates of 50 seeds each. The seeds were placed between layers of germination paper pre-soaked in distilled water. The samples were maintained at  $25 \pm 1.0$  °C under a 12-h light/dark cycle. The number of normal seedlings was counted on the days 5 and 8 days (Brasil, 2009). The results were expressed as the percentage of normal seedlings.

### **3.3.7 Seedling length and dry mass**

For seedling length, 25 normal seedlings were selected from the standard germination test; their total length was measured using a caliper and expressed in centimeters. The cotyledons were removed for dry mass, and the seedlings were dried in a forced-air oven at 60 °C until a constant weight was achieved. The seedlings were then weighed to a resolution of 0.001 g, and the data were expressed in grams of dry matter per sample (Brasil, 2009).

### **3.3.8 Hydrogen peroxide content and enzyme activity**

The H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> content was determined according to the method of Loreto and Velikova (2001), which consisted of homogenizing 0.3 g of seed samples in 3 mL of 0.1% trichloroacetic acid (w/v). The homogenate was centrifuged at 12,000 x g for 15 min at 4 °C. Subsequently, 0.5 mL of the supernatant was combined with 0.5 mL of 10 mM potassium phosphate buffer (pH 7.0) and 1 mL of 1 MKI. The H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> concentration in the supernatant was assessed by comparing its absorbance at 390 nm with a standard calibration curve. The H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> concentration was expressed as  $\mu\text{mol g}^{-1}$  of fresh mass.

The POD and SOD activities were determined as follows: 1 g of the samples was homogenized in 3 mL of 0.05 M sodium phosphate buffer (pH 7.8), containing 1 mM EDTA and 2% (w/v) polyvinylpyrrolidone. After centrifugation at 13,000 x g for 20 min at 4 °C, the supernatant was used for enzyme activity assays (Zhu et al., 2004).

The activity of non-specific peroxidases in the extract was determined according to Zeraik et al. (2008) using guaiacol as a substrate. The reaction mixture consisted of 1.0 mL of potassium phosphate buffer (100 mM, pH 6.5), 1.0 mL of guaiacol (15 mM), and 1.0 mL of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (3 mM). Upon homogenization, 50  $\mu\text{L}$  of the sample extract was added. The enzyme activity was gauged by the guaiacol oxidation to tetraguaiacol, indicated by an increase in absorbance at 470 nm. The results were expressed in enzyme units per mg of protein ( $\text{U mg}^{-1}$  protein). The molar extinction coefficient used for the calculation was  $26.6 \text{ mM}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ .

The SOD activity was assessed using the spectrophotometric method of Giannopolitis and Ries (1977). The reaction mixture contained 50 mM potassium phosphate buffer (pH 7.8), 13 mM methionine, 2  $\mu\text{M}$  riboflavin, 75  $\mu\text{M}$  nitrobluetetrazolium (NBT), 0.1 mM EDTA, and 50  $\mu\text{L}$  of enzyme extract. The conversion of NBT into blue formazan was monitored by observing the increase in absorbance at 560 nm. The reaction was executed in test tubes at 25 °C illuminated by a 15W fluorescent lamp. As a control, tubes with the reaction mixture were kept in the dark. The reaction was initiated by activating the light and subsequently terminated

after 20 minutes by deactivating the light. One SOD unit was defined as the amount of enzyme that inhibited NBT photoreduction by 50% (Beauchamp and Fridovich, 1971). The assay involves the photochemical excitation of riboflavin, which is reduced by methionine to semiquinone, donating an electron to oxygen and forming the superoxide radical. This superoxide radical converts NBT into blue formazan. Superoxide dismutase catalyzes the reaction:  $2\text{O}_2^{\cdot-} + 2\text{H}^+ = \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}_2$ .

### **3.3.9 Experimental plots in the field**

In the first experimental year, the plots were sown in the municipality of Júlio de Castilhos, at the DDPA, using a SEMEATO® model SHP 249 seeder, with four sowing lines spaced 0.5 m apart. Each plot was 5.0 m long, totaling 10 m<sup>2</sup>/plot. The sowing density was 15 seeds per linear meter, resulting in a total density of 30 plants/m<sup>2</sup>, sown at a depth of 5.0 cm. The effective harvesting area constituted 5.0 m<sup>2</sup>, corresponding to the two central rows of each plot, which were subsequently utilized to estimate yields.

In the second experimental year, sowing occurred in the Santa Maria municipality at the Research Group on Ecophysiology and Management of Annual Crops (GEMCA). Sowing was performed manually, with rows spaced 0.5 m apart in a 5.0 m-long plot, totaling 10 m<sup>2</sup>/plot. The sowing density was 15 seeds per linear meter, yielding a total density of 30 plants/m<sup>2</sup>, sown at a depth of 5.0 cm. The effective harvesting area was 5.0 m<sup>2</sup>, taken from the two central rows of each plot and later used for yield estimations.

### **3.3.10 Seedling emergence in the field**

Emergence was assessed 21 days after sowing by counting emerged seedlings in each replicate. Seedlings with exposed cotyledonary petioles were considered. The results were expressed as the number of plants per square meter (Brasil, 2009).

#### **3.4.11 Leaf area index**

The leaf area index (LAI) was determined using a non-destructive method as proposed by Richter et al. (2014). Measurements were taken for one plant per replication. The length and width of each central leaflet of the trifoliolate were measured at phenological stages V2, V7, R1, and R5, following the scale set by Fehr and Caviness (1977). The equation to calculate leaf area was  $LA = 2.0185 \times (L \times W)$ .

#### **3.4.12 Productivity**

To estimate yields, the size of the experimental plot was 10 m<sup>2</sup>. A 5-m<sup>2</sup> section of plants from the two central rows of each plot was harvested. Upon harvesting, the material was screened, classified, and then weighed. Yields were adjusted to a 13% grain moisture reference.

### **3.4 Statistical analysis**

The storage experiments employed a completely randomized design and were analyzed in a factorial arrangement. The arrangement included three storage conditions and four storage temperatures in first year and four storage conditions and three storage temperatures in second year. Each condition comprised four replications, each consisting of 1 kg of seeds. For the variables examined in the field, a randomized block design was utilized with the same

storage conditions and temperature factors. Data were assessed for error normality and residual variance homogeneity and subjected to analysis of variance ( $p < 0.05$ ). The Scott-Knott test was performed for mean comparisons using the statistical software (SISVAR<sup>®</sup>).

## 3.5 RESULTS AND DISCUSSION

### 3.5.1 Electrical conductivity

Electrical conductivity is considered an effective technique for separating seed lots as it primarily provides information on vigor. Seed vigor is fundamental for associating physiological quality with responses after storage, such as plant structure, growth, and development (Vieira et al., 1999; Wang et al., 2019). During the first year of storage, the variables analyzed showed differences between the atmospheric conditions and temperatures tested. The seeds' electrical conductivity (EC) increased with storage time and temperature, particularly at 25 °C, under all three atmospheric conditions (Figure 3a).

At two months of storage, seeds stored at 10 and 15 °C under ambient and 1.0 kPa O<sub>2</sub> had lower EC than those stored at 20 and 25 °C (Figure 2a). In the 1.0 kPa O<sub>2</sub> + 15.0 kPa CO<sub>2</sub> condition, the 10 °C temperature yielded lower EC than other temperatures. The 25 °C temperature under ambient and 1.0 kPa O<sub>2</sub> conditions resulted in seeds with lower EC than this same temperature under 1.0 kPa O<sub>2</sub> + 15.0 kPa CO<sub>2</sub>. At four months, seeds stored at 10 and 15 °C under ambient conditions had lower EC compared to those stored at 20 and 25 °C. Under the 1.0 kPa O<sub>2</sub> and 1.0 kPa O<sub>2</sub> + 15.0 kPa CO<sub>2</sub> conditions, seeds stored at 10, 15, and 20 °C had lower EC than those stored at 25 °C. Moreover, seeds stored at 25 °C under 1.0 kPa O<sub>2</sub> had lower EC compared to those under the ambient and 1.0 kPa O<sub>2</sub> + 15.0 kPa CO<sub>2</sub> conditions. At six months, seeds stored at 25 °C had higher EC than those stored at 10, 15, and 20 °C under all three conditions. Among the temperatures, ambient conditions at 10, 15,



Figure 3a- Electrical conductivity, thousand seed weight, moisture content and soybean germination test of cultivar NA 5909 RR after storage for 6 months in different temperatures and controlled atmosphere conditions. Squares with the lower-case and upper-case letters so not differ, respectively, between temperatures in the same condition and between the same temperatures in the three conditions by the Scott-Knott test ( $p < 0,05$ ). \*LSD= Least Significant Difference, Santa Maria, 2021.

### 3.5.2 Water content

The seeds' water content did not vary when CA conditions were used throughout storage (Figure 2a). Seeds stored under ambient conditions at 10, 15, and 25 °C showed lower water content percentages than seeds stored under CA conditions, indicating moisture loss. This result is related to the hygroscopic balance of the seed, which tends to adjust its internal water content based on the storage period, relative humidity, and storage temperature. This may also have influenced the thousand-seed weight. After six months, the thousand-seed weight under ambient conditions was observed to be lower, particularly at 10 and 25 °C compared to 15 and 20 °C (Figure 3a).

In the second year, the results were consistent with those from the first year. There was no change in the water content of seeds stored under CA conditions. However, seeds stored under ambient conditions at all tested temperatures showed lower water content than those stored under CA conditions in all evaluated months (Figure 3b). Fluctuations in relative humidity and temperature affect the water content and weight of the seeds. In this study, seeds stored under ambient conditions showed variations in both water content and seed weight (Figures 3a and 3b). Conversely, seeds stored under CA conditions exhibited no variation in either water content or thousand-seed weight, supporting previous studies that found less fluctuation in water content when seed was stored under hermetic systems (Bartosik et al., 2008; Alencar et al., 2009; Schons et al., 2018). Using controlled atmosphere storage, Ludwig et al. (2021a) also observed no significant changes in water content after seven months of

storage for NA 5909 RR and FEPAGRO 37RR seed cultivars. These findings reinforce the benefits of hermetic storage, as abrupt changes in water content are not observed within the silos, which is crucial for maintaining seed quality.

### 3.5.3 Standard germination test

At four months, seeds stored under ambient conditions at temperatures of 15, 20, and 25 °C, as well as those stored under 1.0 kPa O<sub>2</sub> + 15.0 kPa CO<sub>2</sub> at 25 °C, exhibited lower germination than the other conditions. At six months, seeds stored at all four temperatures under ambient conditions had lower germination compared to the 1.0 kPa O<sub>2</sub> and 1.0 kPa O<sub>2</sub> + 15.0 kPa CO<sub>2</sub> conditions, except at 25 °C, in which the 1.0 kPa O<sub>2</sub> + 15.0 kPa CO<sub>2</sub> condition did not differ from its ambient counterpart. Within each temperature range, no differences were observed under the 1.0 kPa O<sub>2</sub> condition. Seeds stored at 25 °C under ambient and 1.0 kPa O<sub>2</sub> + 15.0 kPa CO<sub>2</sub> conditions had lower germination than the 1.0 kPa O<sub>2</sub> condition (Figure 3a).

In the second experimental year, germination at four months was higher when seeds were stored at 10 °C compared to 20 °C. At six months, seeds stored under the 1.0 kPa O<sub>2</sub> condition at 10 °C exhibited higher germination compared to other tested conditions at this temperature (Figure 3b). The results indicate that as the storage period progresses, the differences between CA and ambient conditions become more pronounced. Similar outcomes were observed by Silva et al. (2018) in beans, where hermetic storage maintained higher germination compared to conventional conditions. Ludwig et al. (2021) also found that seeds stored under controlled atmosphere conditions with 1.0 and 2.0 kPa O<sub>2</sub> had higher germination than those stored under ambient conditions after seven months at 20 and 25 °C. These findings corroborate the results of the present study.

Variables	Months	AMBIENT			1 kPa O <sub>2</sub>			3 kPa O <sub>2</sub>			5 kPa O <sub>2</sub>			LSD	Legend				
		10 °C	15 °C	20 °C	10 °C	15 °C	20 °C	10 °C	15 °C	20 °C	10 °C	15 °C	20 °C						
Electrical Conductivity ( $\mu\text{S}/\text{cm}^{-1} \text{g}^{-1}$ )	0													4.1	Minimum	45.62		59.11	Maximum
	2	Ab	Ab	Aa	Bb	Bb	Ba	Bb	Ba	Aa	Ab	Aa	Aa	3.8					
	4	Ab	Ab	Aa	Bb	Aa	Aa	Ab	Aa	Aa	Ab	Aa	Aa	5.1					
	6	Ab	Ab	Aa	Bb	Ab	Ba	Bb	Aa	Aa	Ab	Ab	Aa	4.2					
Moisture content (%)	0													0.32	Minimum	11.2		11.7	Maximum
	2	Ba	Ba	Ba	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	0.21					
	4	Ba	Ba	Ba	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	0.11					
	6	Bb	Ba	Ba	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	0.22					
Germination (%)	0													3.2	90		96		
	2	ns												3.4					
	4	Aa	Bb	Bb	Aa	Aa	Ab	Aa	Aa	Bb	Ba	Ba	Bb	3.5					
	6	Ba	Ab	Ab	Aa	Aa	Ab	Ba	Aa	Aa	Ba	Ba	Ba	2.1					

Figure 3b- Electrical conductivity, water content and germination test of soybean of cultivar NA 5909 RR after storage for 6 months in different temperatures and controlled atmosphere conditions. Squares with the lower-case and upper-case letters so not differ, respectively, between temperatures in the same condition and between the same temperatures in the three conditions by the Scott-Knott test ( $p < 0,05$ ). \* LSD= Least Significant Difference, Santa Maria, 2022.

### 3.5.4 Seedling length

Other key variables for representing seed vigor include seedling length and dry mass (Marcos-Filho, 2015). Notably, the most significant differences in total seedling length were observed at four and six months of storage (Figure 4a). At the four-month, the temperatures of 15, 20, and 25 °C under 1.0 kPa O<sub>2</sub> + 15.0 kPa CO<sub>2</sub> exhibited lower total seedling lengths than at 10 °C. No differences were observed between these temperatures or storage conditions at ambient levels and 1.0 kPa O<sub>2</sub> (Figure 4a). Conversely, at six months, seeds stored in 1.0 kPa O<sub>2</sub> displayed greater total lengths across all temperatures compared to the ambient condition. Additionally, these seeds showed greater total lengths at 15, 20, and 25 °C compared to the 1.0 kPa O<sub>2</sub> + 15.0 kPa CO<sub>2</sub> condition (Figure 3a).

In the second year of the experiment, seeds stored at 5.0 kPa O<sub>2</sub> and subjected to 10 °C exhibited greater total seedling lengths than those stored at 15 and 20 °C. At six months of storage, seeds stored at ambient conditions and 5.0 kPa O<sub>2</sub> at 20 °C had shorter total lengths

than those stored at 1.0 kPa O<sub>2</sub> and 3.0 kPa O<sub>2</sub> (Figure 4b). Furthermore, seeds stored at 10 and 15 °C showed greater total seedling lengths than those stored at 20 °C (Figure 4b). This highlights the effect of temperature on the loss of seed physiological quality. The importance of utilizing different vigor tests is also noteworthy. For example, storage at 20 °C under 3.0 and 5.0 kPa O<sub>2</sub> conditions provided similar germination to storage at 10 and 15 °C (Figure 3b). Nonetheless, a decline in total seedling length was observed, indicating a greater loss of vigor in seeds stored at 20 °C.

Variables	Months	AMBIENT				1 kPa O <sub>2</sub>				1 kPa O <sub>2</sub> + 15kPa CO <sub>2</sub>				LSD	LEGEND			
		10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C		Minimum			Maximum
Total length of seedlings (cm)	0													0.73	8.6		14.4	
	2	Aa	Aa	Aa	Ab	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	0.64				
	4	Aa	Aa	Aa	Ab	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Ab	Ab	Ab	0.85				
	6	Ba	Ba	Ba	Ba	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Bb	Bb	Bb	0.83				
seedling dry matter (g)	0													0.02	0.26		0.45	
	2	ns*												0.02				
	4	Aa	Aa	Aa	Ab	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	0.02				
	6	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Bb	Bb	Bb	0.03				

Figure 4a- Total length of seedlings and seedling dry matter of soybean of cultivar NA 5909 RR after storage for 6 months in different temperatures and controlled atmosphere conditions. Squares with the lower-case and upper-case letters so not differ, respectively, between temperatures in the same condition and between the same temperatures in the three conditions by the Scott-Knott test ( $p < 0.05$ ). \* LSD= Least Significant Difference, Santa Maria, 2021.

### 3.5.5 Dry mass

Seed vigor can also be assessed through the maintenance of dry mass and the potential to produce long seedlings after storage (Santos et al., 2005). According to Banks (2006) and Amaro et al. (2015), these variables enable seed batches to be categorized based on their varying degrees of vigor and can thus be linked to the degree of seed deterioration.

Seedling length can also correlate with dry mass (Vanzolini et al., 2007), and this study demonstrated a relationship between plant length and seedling dry mass under CA conditions (Figure 4a). Similar findings have been reported for the cultivars TECIRGA 60 70RR and FEPAGRO 37RR. Here, seed stored under 1.0 kPa O<sub>2</sub> and 2.0 kPa O<sub>2</sub> showed greater total seedling lengths along with higher dry mass values after seven months of storage

compared to ambient conditions at 20 and 25 °C (Ludwig et al., 2021a). However, temperatures of 15, 20, and 25 °C in the 1.0 kPa O<sub>2</sub> + 15.0 kPa CO<sub>2</sub> condition led to lower total length and dry mass of seedlings compared to the 1.0 kPa O<sub>2</sub> and ambient conditions. This suggests greater seed deterioration, particularly with an increased storage temperature, which may be related to decreased antioxidant enzyme activity (e.g., guaiacol peroxidase). Lower enzyme activity was observed under this condition, along with a higher content of hydrogen peroxide (Figure 5a).

In the year 2022, the main statistical differences were noted at four and six months of storage. At four months, seeds stored at 10 °C showed greater dry mass than 15 and 20 °C under ambient and 1.0 kPa O<sub>2</sub> conditions. Moreover, greater dry mass was observed for seeds stored at 20 °C in the 3.0 kPa O<sub>2</sub> condition, with no differences from the temperature of 15 °C (Figure 4b). This result parallels the findings at six months of storage, where all three tested temperatures in the 5.0 kPa O<sub>2</sub> condition showed lower seedling dry mass than other atmospheric conditions at the same temperatures (Figure 4b). The mass loss after two and four months was more pronounced in seeds stored at 20 °C at 3.0 kPa O<sub>2</sub> compared to 10 and 15 °C (Figure 4b). Seeds stored under 5.0 kPa O<sub>2</sub> at 10 °C exhibited less mass loss than those stored at 15 and 20 °C. At six months, the 1.0 kPa O<sub>2</sub> condition showed equal or less mass loss compared to other tested conditions. Additionally, seeds stored at 20 °C exhibited greater mass loss in ambient, 3.0 kPa O<sub>2</sub>, and 5.0 kPa O<sub>2</sub> conditions compared to 10 and 15 °C (Figure 4b).

This study indicates that increasing CO<sub>2</sub> levels in a controlled atmosphere, for the concentrations studied, did not improve the maintenance of seed physiological quality. Similar results have been reported for studies using higher CO<sub>2</sub> levels (50.0 and 80.0 kPa) associated with low O<sub>2</sub> levels (1.0 and 2.0 kPa) in soybeans and beans (Ludwig, 2019; Berghetti, 2020), as well as with O<sub>2</sub> levels (1.0 and 2.0 kPa) associated with CO<sub>2</sub>

concentrations of 15.0 and 30.0 kPa after seven months of soybean storage (Ludwig et al., 2021). These researchers demonstrated that attributes, including germination and seedling length and dry mass, were not maintained compared to conditions with low O<sub>2</sub> in isolation. This observation could carry significant practical implications, as it simplifies the adoption of hermetic storage methods by necessitating only reduced oxygen levels in the silos, achievable through nitrogen-based air purging.

Combining 15.0 kPa CO<sub>2</sub> with 1.0 kPa O<sub>2</sub> was shown to have an antagonistic effect on variables such as dry mass, seedling length, and germination on paper, particularly at temperatures above 15 °C and after six months of storage. Berghetti (2020) reported lower physical quality and longer cooking times in beans stored at 25 and 30 °C for seven months and under higher CO<sub>2</sub> levels (50.0 and 80.0 kPa) associated with low O<sub>2</sub> levels (1.0 and 2.0 kPa) compared to ambient conditions using low O<sub>2</sub> in isolation. Kaminski et al. (2013) also noted longer cooking times for rice at temperatures above 25 °C, indicating that a controlled atmosphere and high temperatures accelerate the aging process of stored grains.

Variables	Months	AMBIENT			1 kPa O <sub>2</sub>			3 kPa O <sub>2</sub>			5 kPa O <sub>2</sub>			LSD	Legend	
		10 °C	15 °C	20 °C	10 °C	15 °C	20 °C	10 °C	15 °C	20 °C	10 °C	15 °C	20 °C			
Total length of seedlings (cm)	0												0.9	11.46	18	
	2	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	0.6			
	4	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Ab	Ab	0.41			
	6	Aa	Aa	Bb	Aa	Aa	Ab	Aa	Aa	Ab	Aa	Aa	Bb			0.3
Loss of seed mass (g)	0												5.7	987.7	1000	
	2	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Ab	Aa	Ab	Ab			4.5
	4	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Ab	Aa	Ab	Ab			5.1
	6	Aa	Aa	Bb	Aa	Aa	Ab	Aa	Aa	Bb	Aa	Bb	Bb			4.3
Seedling dry matter (g)	0												0.04	0.3	0.5	
	2	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Bb	0.05			
	4	Aa	Ab	Ab	Aa	Ab	Ab	Aa	Aa	Ab	Aa	Aa	Aa			0.04
	6	Aa	Ab	Ab	Aa	Ab	Ab	Aa	Aa	Ab	Ba	Ba	Ba			0.03

Figure 4b- Length of seedlings, loss of seed mass and seedling dry matter of soybean of cultivar NA 5909 RR after storage for 6 months in different temperatures and controlled atmosphere conditions. Squares with the lower-case and upper-case letters so not differ, respectively, between temperatures in the same condition and between the same temperatures in the three conditions by the Scott-Knott test (p<0,05). \* LSD= Least Significant Difference, Santa Maria, 2022.

### 3.5.6 Enzyme activity

In this study, the effects of CA storage conditions on seeds' antioxidant systems were examined. Specifically, the focus was on understanding how reduced partial oxygen pressure ( $pO_2$ ) could lead to lower metabolic activity and, subsequently, fewer free radicals. This is critical for the cellular antioxidant system (Mittler, 2017), with particular attention to the enzymatic activities of superoxide dismutase (SOD) and (a), guaiacol peroxidase (POD), as well as  $H_2O_2$  content, one of the ROS generated during cellular metabolism, including germination (Amorim et al., 2023).

Biochemical assessments, such as those conducted by Carvalho et al. (2014), are instrumental in understanding seed deterioration and longevity throughout storage. Identifying shifts in antioxidant enzyme activities is vital for comprehending the protective mechanisms in play during seed storage and germination. Here, the synchronized action of antioxidant enzymes can offer enhanced stress tolerance via cellular detoxification.

During the first year of the experiment, the enzymatic activities of SOD and POD in seeds stored under CA conditions at 10 °C were elevated compared to ambient conditions (Figures 5a and 5b). This suggests a slower rate of deterioration under CA conditions, as corroborated by improved metrics such as seedling length, germination, and EC (Figures 3a and 4a). Elevated antioxidant enzyme activities indicate a heightened capacity to neutralize ROS, thereby reducing cellular damage (Kong et al., 2023). This also improves seed germination and initial seedling growth. Furthermore, higher antioxidant enzyme activities diminish the likelihood of hydroxyl radical formation via Fenton and Haber-Weiss reactions (Gutteridge & Halliwell, 1990).

Similar observations were made with TMG 1176 soybean seeds after 6 and 8 months of cold storage (10 °C and 50% relative humidity), which maintained high SOD activities compared to seeds stored without controlled conditions (Carvalho et al., 2014). Previous

studies across various species have also linked the loss of seed viability to decreased SOD activity (Murthy et al., 2002; Bao et al., 2011; Kibinza et al., 2006).

At 25 °C, seeds stored under CA conditions displayed higher SOD activity than those stored under ambient conditions (Figure 4a). For POD activity, the 1.0 kPa O<sub>2</sub> and ambient conditions outperformed the 1.0 kPa O<sub>2</sub> + 15.0 kPa CO<sub>2</sub> condition. All tested conditions at 25 °C had lower POD activities than at 10 °C, indicating that seed deterioration is more pronounced at this elevated temperature. Additionally, the 1.0 kPa O<sub>2</sub> + 15.0 kPa CO<sub>2</sub> condition at 25 °C had higher H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> content than the ambient condition, suggesting accelerated seed deterioration under these specific conditions (Figures 5a–5c).

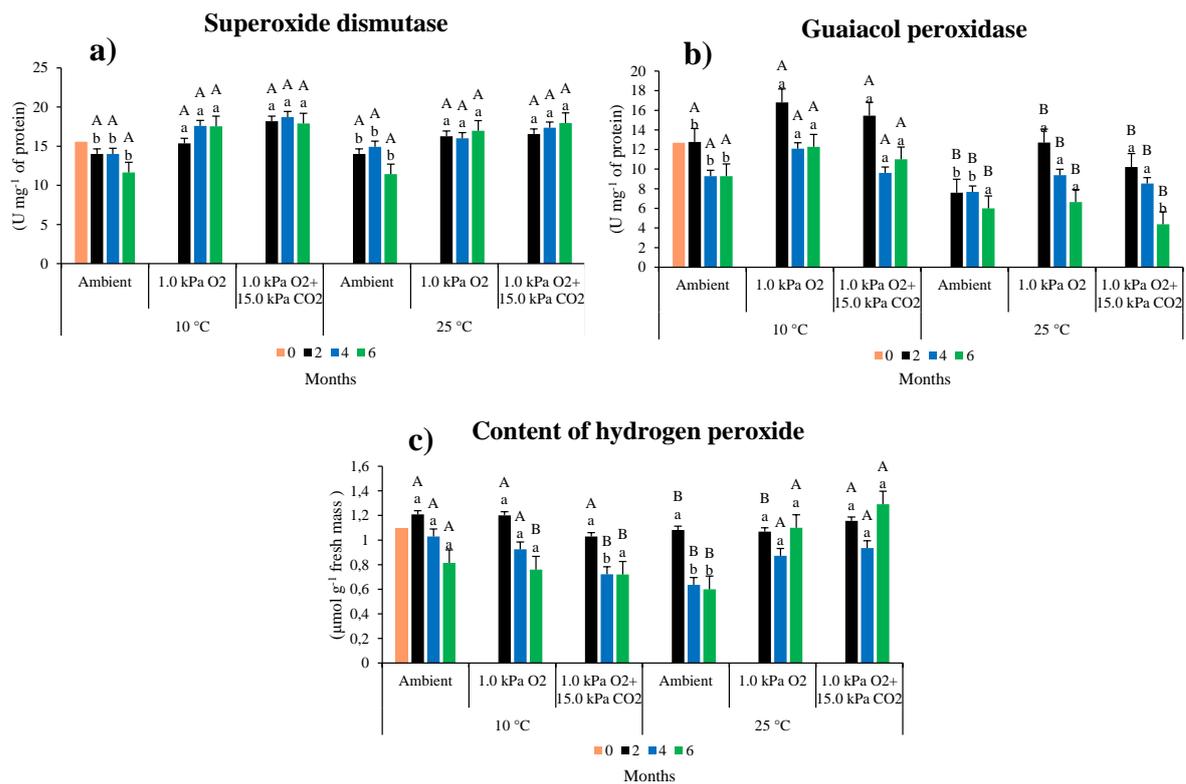


Figure 5a- Activity of the enzymes superoxide dismutase-SOD (a), guaiacol peroxidase-POD (b), and content of hydrogen peroxide-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (c) of soybean of cultivar NA 5909 RR after storage for 6 months in different temperatures and controlled atmosphere conditions. Bars with the same lower-case letters in the same temperature and bars with the same upper-case letters in different temperatures do not differ by the Scott-Knott test ( $p < 0,05$ ) at 5% probability. Error bars represent standard deviations, Santa Maria, 2021.

In the second year of storage, seeds stored under CA conditions at 10 °C continued to exhibit higher SOD activities than those under ambient conditions (Figure 5b). Elevated temperatures were found to hasten seed deterioration and inhibit enzymatic activity, thus compromising seed defense mechanisms. As a result, POD activities were consistently higher under CA conditions at both tested temperatures. Notably, seeds stored at 25 °C showed lower POD activity than those stored at 10 °C (Figure 5b). Significant variations in H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> content were primarily observed between different temperatures and atmospheric conditions at 10 °C. The 1.0 and 3.0 kPa O<sub>2</sub> conditions showed increased H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> levels compared to ambient conditions, especially at four and six months of storage (Figure 5b).

This study underscores the importance of storage conditions in influencing the enzymatic profile of seeds, thereby affecting variables like electrical conductivity, seedling length, and germination. The findings reveal that enzymatic changes become more pronounced as the storage period draws to a close.

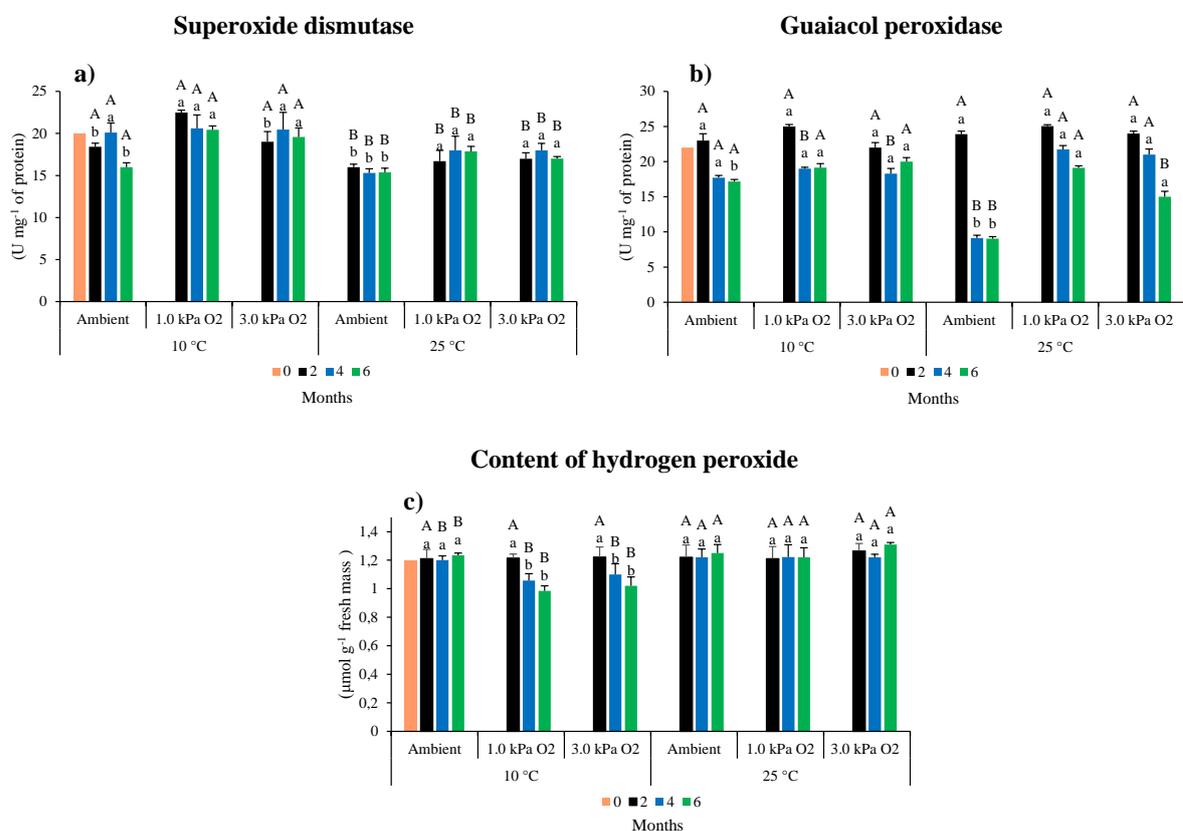


Figure 5b-Activity of the enzymes superoxide dismutase-SOD (a), guaiacol peroxidase-POD (b), and content of hydrogen peroxide-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (c) of soybean of cultivar NA 5909 RR after storage for 6 months in different temperatures and controlled atmosphere conditions. Bars with the same lower-case letters in the same temperature and bars with the same upper-case letters in different temperatures do not differ by the Scott-Knott test ( $p < 0,05$ ) at 5% probability. Error bars represent standard deviations, Santa Maria, 2021.

### 3.5.7 Field emergence

Several variables were analyzed across both experimental years to more effectively assess the impact of seed storage conditions on field performance. One such key variable is field emergence, which is crucial for evaluating the initial establishment of the crop. Seeds possessing high physiological quality yield better field performance. Therefore, proper storage conditions are essential to minimize variability in the initial establishment of crops (Peske et al., 2019; Marcos Filho, 2015).

In the first experimental year, seeds stored under ambient conditions at 10 °C demonstrated higher emergence than those stored at 15, 20, and 25 °C (Figure 6a). Additionally, seeds stored under 1.0 kPa O<sub>2</sub> conditions at 10 °C had higher emergence than those stored at 20 and 25 °C. These seeds did not differ in emergence from those stored at the same O<sub>2</sub> levels but at 15 and 20 °C. Nevertheless, they did show significantly higher emergence than those stored at 25 °C. A more significant discrepancy in emergence between 10 and 25 °C was observed, with intermediate values appearing at 15 and 20 °C (Figure 6a). No significant differences in field emergence were noted in the second experimental year (Figure 6b).

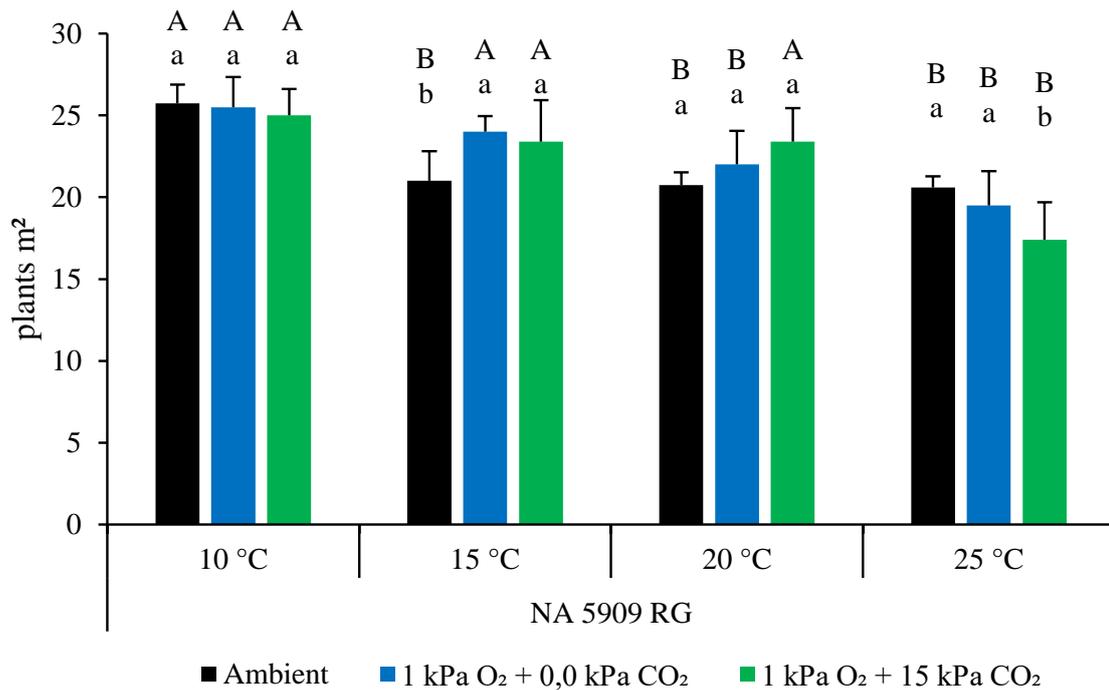


Figure 6a- Seed field emergence of soybean of cultivar NA 5909 RR after storage for 6 months in different temperatures and controlled atmosphere conditions. Bars with the same lower-case letters in the same temperature and bars with the same upper-case letters in different temperatures do not differ by the Scott-Knott test ( $p < 0,05$ ) at 5% probability. Error bars represent standard deviations, Santa Maria, 2021.

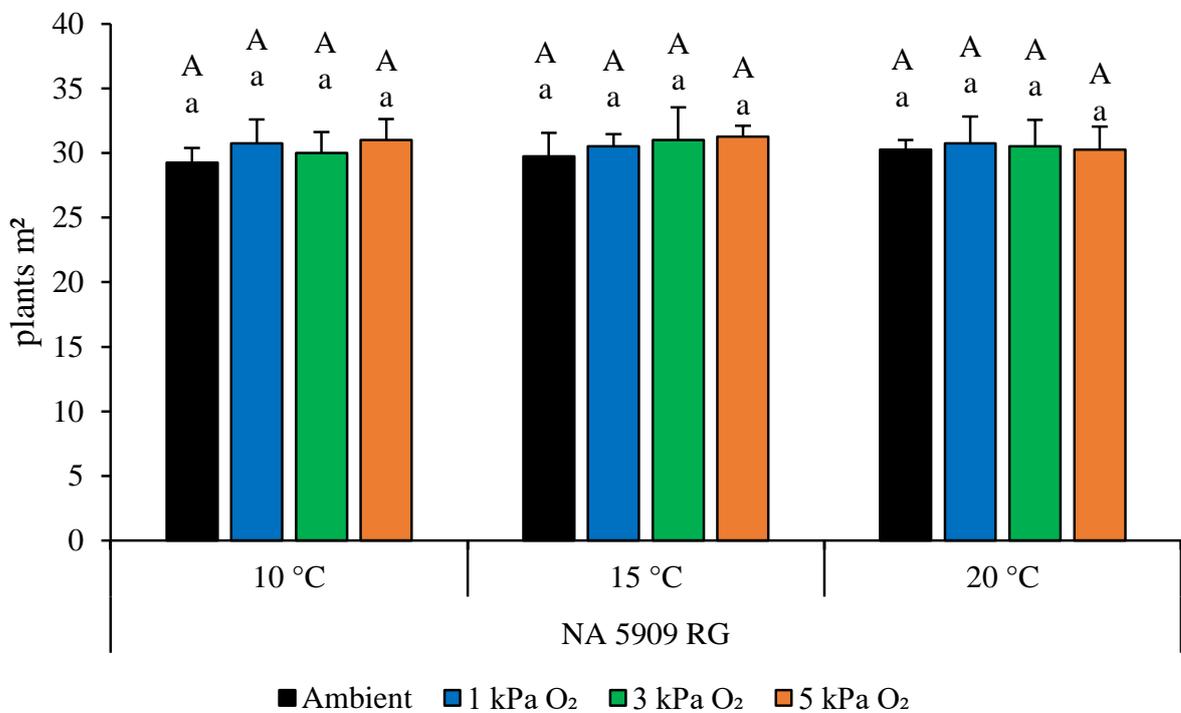


Figure 6b-Seed field emergence of soybean of cultivar NA 5909 RR after storage for 6 months in different temperatures and controlled atmosphere conditions. Bars with the same lower-case letters in the same temperature and bars with the same upper-case letters in different temperatures do not differ by the Scott-Knott test ( $p < 0,05$ ) at 5% probability. Error bars represent standard deviations, Santa Maria, 2022.

### 3.5.8 Plant height

Plant height and leaf area index (LAI) were assessed at four key developmental stages: V2 and V4 for initial establishment, R1 as the initial stage of the reproductive phase, and R5, which marks the reproductive stage with the greatest leaf area in the soybean crop. No differences were observed in plant height at the V2 stage. However, by the V4 stage, seeds stored at 10 °C under 1.0 kPa O<sub>2</sub> and 1.0 kPa O<sub>2</sub> + 15.0 kPa CO<sub>2</sub> exhibited a larger leaf area than those stored under ambient conditions (Figure 6a). Notably, even under low storage temperatures, using low pO<sub>2</sub> positively impacted plant height, suggesting that controlled atmosphere storage may be a valuable tool for maintaining seed quality throughout the crop cycle.

At the R1 developmental stage, seeds stored under 1.0 kPa O<sub>2</sub> and 1.0 kPa O<sub>2</sub> + 15.0 kPa CO<sub>2</sub> conditions showed greater plant height compared to those stored under ambient conditions at 10, 15, and 20 °C (Figure 6a). Conversely, at 25 °C, seeds stored under the 1.0 kPa O<sub>2</sub> + 15.0 kPa CO<sub>2</sub> condition showed a reduction in plant height compared to those in ambient conditions. Similarly, seeds stored under 1.0 kPa O<sub>2</sub> conditions at 25 °C also showed reduced height compared to the same storage conditions at lower temperatures. At the R5 stage, a difference in plant height was only observed at 10 °C, where seeds stored under ambient conditions had lower plant height than those stored under 1.0 kPa O<sub>2</sub> and 1.0 kPa O<sub>2</sub> + 15.0 kPa CO<sub>2</sub> conditions (Figure 7a).

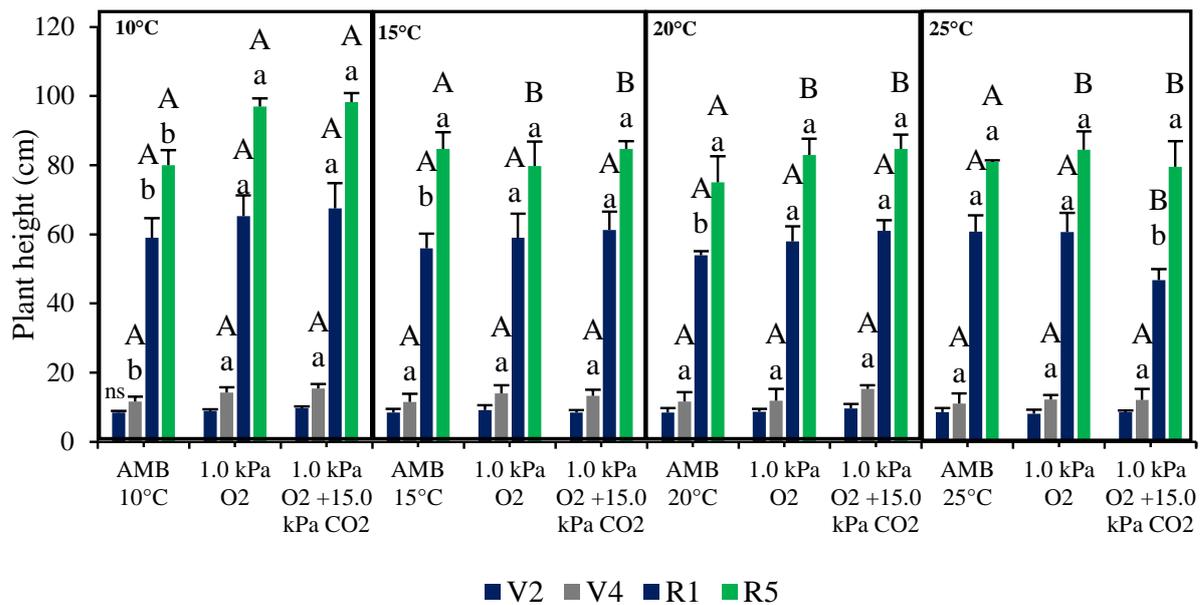


Figure 7a- Plant height of soybean of cultivar NA 5909 RR after storage for 6 months in different temperatures and controlled atmosphere conditions. Bars with the same lower-case letters in the same temperature and bars with the same upper-case letters in different temperatures do not differ by the Scott-Knott test ( $p < 0.05$ ) at 5% probability. Error bars represent standard deviations, Santa Maria, 2021.

In the second year of the experiment, plant height remained consistent across all conditions at the V2 stage. However, by the V4 stage, seeds stored at 10 °C under 1, 3, and 5.0 kPa O<sub>2</sub> conditions exhibited greater plant height than those under ambient conditions. During the R1 stage, seeds stored at 15 °C under 1 and 3.0 kPa O<sub>2</sub> conditions had greater plant height than those stored under ambient conditions and 5.0 kPa O<sub>2</sub> (Figure 7b). At the R5 stage, seeds stored at 10 °C under controlled atmospheres outperformed those in ambient conditions in terms of plant height.

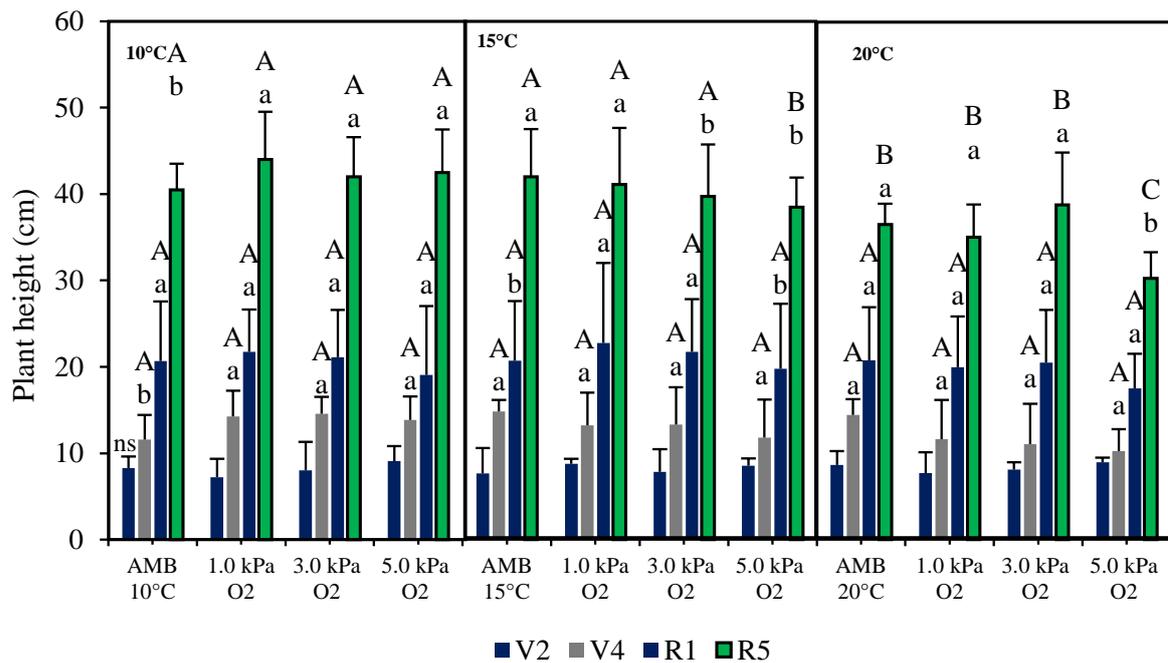


Figure 7b-Plant height of soybean of cultivar NA 5909 RR after storage for 6 months in different temperatures and controlled atmosphere conditions. Bars with the same lower-case letters in the same temperature and bars with the same upper-case letters in different temperatures do not differ by the Scott-Knott test ( $p < 0,05$ ) at 5% probability. Error bars represent standard deviations, Santa Maria, 2022.

As indicated by height, plant growth is intrinsically linked to seed vigor. Seeds of high vigor yield plants with robust root systems, enabling greater nutrient accumulation and, consequently, more substantial vegetative growth (Bagateli et al., 2019). Evidence has shown that seeds with higher vigor, as determined by accelerated aging tests, result in taller plants in various soybean cultivars (Bagateli et al., 2019; Scheeren et al., 2010). These findings corroborate our study, which demonstrated that seeds stored under controlled atmosphere conditions, particularly at 10 °C, demonstrated both greater vigor and taller plants in the field.

### 3.5.9 Leaf area index

The LAI is defined as the ratio between the leaf area (LA) and the ground area occupied by the plant. The anticipated yield in a crop is fundamentally determined by the plant's capability to intercept solar radiation through its leaf area and convert this radiation into dry matter via photosynthesis (Heiffih et al., 2006; Zanon et al., 2015). There were no differences between the leaf area index of plants at phenological stage V2 (Figure 6). At stage V4, seeds stored at 10 °C in controlled atmosphere conditions of 1.0 kPa O<sub>2</sub> and 1.0 kPa O<sub>2</sub> + 15.0 kPa CO<sub>2</sub> showed greater leaf area than under ambient conditions.

No differences were observed in the leaf area index for the R1 reproductive stage. However, at reproductive stage R5, seeds stored under ambient conditions at 10 °C resulted in plants with a lower leaf area index than those in controlled atmosphere conditions. Additionally, the controlled atmosphere conditions at this temperature had a higher LAI than those at 15, 20, and 25 °C. Specifically, at 25 °C, the 1.0 kPa O<sub>2</sub> + 15.0 kPa CO<sub>2</sub> condition had a lower leaf area index than under ambient and 1.0 kPa O<sub>2</sub> conditions (Figure 8a).

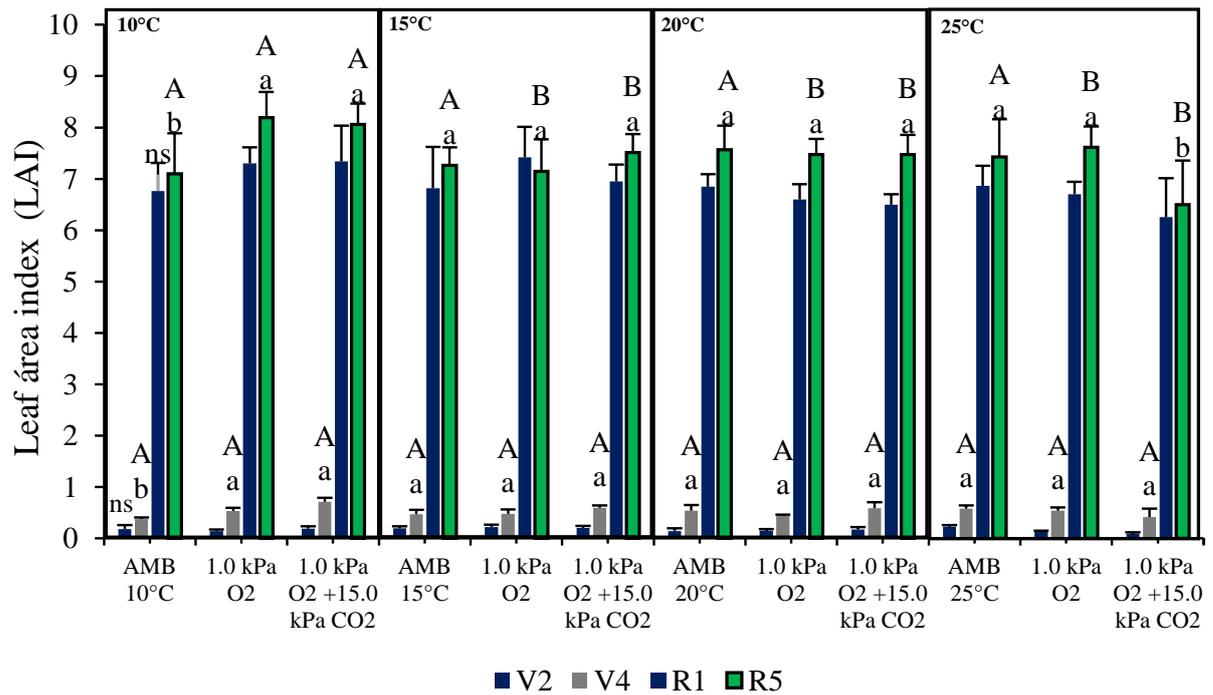


Figure 8a- Leaf area index (LAI) of soybean of cultivar NA 5909 RR after storage for 6 months in different temperatures and controlled atmosphere conditions. Bars with the same lower-case letters in the same temperature and bars with the same upper-case letters in different temperatures do not differ by the Scott-Knott test ( $p < 0.05$ ) at 5% probability. Error bars represent standard deviations, Santa Maria, 2021.

In the second year, no differences were found in the LAI at the V2 stage (Figure 8b). At the V4 stage, seeds stored at 10 °C under 1.0 kPa O<sub>2</sub> conditions resulted in plants with a greater leaf area than ambient, 3.0 kPa O<sub>2</sub>, and 5.0 kPa O<sub>2</sub> conditions. At the R1 stage, seeds stored at 10 °C under 1 and 3.0 kPa O<sub>2</sub> conditions produced plants with a greater leaf area than ambient and 5.0 kPa O<sub>2</sub> conditions. At the R5 stage, seeds stored at 10 °C under 1.0 kPa O<sub>2</sub> conditions yielded plants with a higher leaf area index than ambient, 3, and 5.0 kPa O<sub>2</sub> conditions. Additionally, all four conditions tested at 10 and 15 °C displayed a higher LAI than other controlled atmosphere conditions at 20 °C (Figure 8b).

The LAI is intrinsically related to productivity in soybean crops (Glier et al., 2015). This association is attributable to the fact that plants with a larger leaf area during the vegetative and/or reproductive phases have greater photosynthetic capacity, enhancing the

supply of photoassimilates to the grains, thereby increasing grain or seed mass (Tavares et al., 2013).

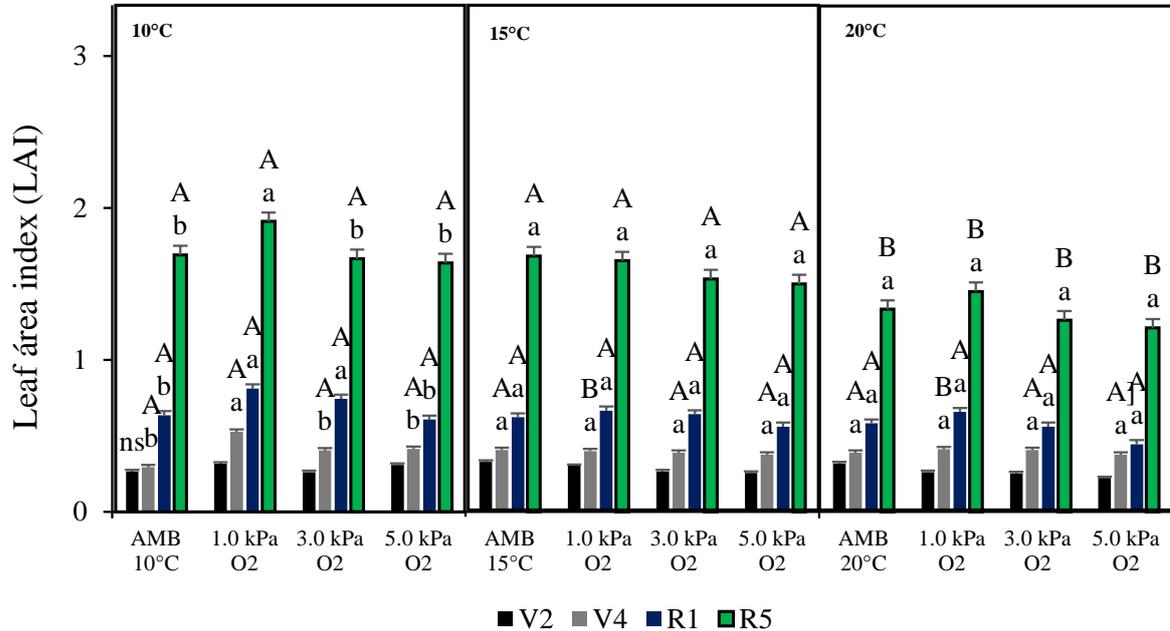


Figure 8b-Leaf area index (LAI) of soybean of cultivar NA 5909 RR after storage for 6 months in different temperatures and controlled atmosphere conditions. Bars with the same lower-case letters in the same temperature and bars with the same upper-case letters in different temperatures do not differ by the Scott-Knott test ( $p < 0.05$ ) at 5% probability. Error bars represent standard deviations, Santa Maria, 2022.

### 3.5.10 Productivity

In terms of yield, the final metric for evaluating the soybean crop development cycle, seeds stored in ambient conditions yielded less compared to those stored under 1.0 kPa O<sub>2</sub> and 1.0 kPa O<sub>2</sub> + 15.0 kPa CO<sub>2</sub> conditions at 10, 15, and 20 °C (Figure 8a). Specifically, at 15 and 20 °C, ambient conditions resulted in lower productivity than controlled atmosphere conditions. However, the CA conditions at these two temperatures were less productive than those at 10 °C. At 25 °C, the 1.0 kPa O<sub>2</sub> CA condition was more productive than the 1.0 kPa O<sub>2</sub> + 15.0 kPa CO<sub>2</sub> condition. The highest yields were observed under 1.0 kPa O<sub>2</sub> and 1.0 kPa O<sub>2</sub> + 15.0 kPa CO<sub>2</sub> at 10 °C compared to 15, 20, and 25 °C (Figure 9a).

Furthermore, at 10 °C, 2,770 and 2,830 kg ha<sup>-1</sup> yields were recorded under 1.0 kPa O<sub>2</sub> and 1.0 kPa O<sub>2</sub> + 15.0 kPa CO<sub>2</sub> conditions, respectively, which were increases of 361.0 and

421.0 kg ha<sup>-1</sup> over the ambient condition, which yielded 2,409 kg ha<sup>-1</sup>. At 15 °C, the 1.0 kPa O<sub>2</sub> and 1.0 kPa O<sub>2</sub> + 15.0 kPa CO<sub>2</sub> conditions showed an increase of 199 and 200 kg ha<sup>-1</sup>, respectively, compared to the ambient condition, which yielded 2,351 kg/ha<sup>-1</sup>. For 20 °C, the ambient condition yielded an average of 2,160 kg ha<sup>-1</sup>, which was 220 and 240 kg ha<sup>-1</sup> less than CA conditions of 1.0 kPa O<sub>2</sub> and 1.0 kPa O<sub>2</sub> + 15.0 kPa CO<sub>2</sub>, respectively.

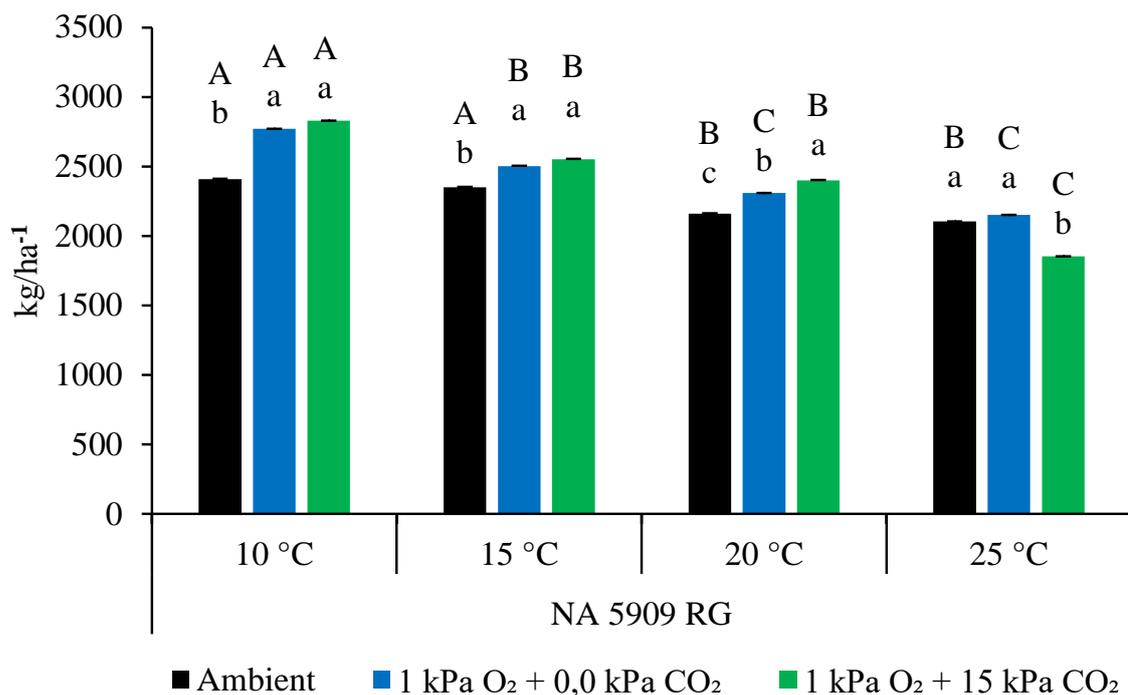


Figure 9a- Productivity of soybean of cultivar NA 5909 RR after storage for 6 months in different temperatures and controlled atmosphere conditions. Bars with the same lower-case letters in the same temperature and bars with the same upper-case letters in different temperatures do not differ by the Scott-Knott test ( $p < 0,05$ ) at 5% probability. Error bars represent standard deviations, Santa Maria, 2021.

In the second experimental year, seeds stored under ambient conditions showed lower yields than the 1.0, 3.0, and 5.0 kPa O<sub>2</sub> conditions at 10 and 15 °C (Figure 7b). No yield differences were observed at 20 °C among the tested conditions. However, CA conditions at 10 and 15 °C outperformed those at 20 °C in terms of productivity (Figure 9b). At 10 °C, yields of 1,385, 1,386, and 1,387 kg/ha<sup>-1</sup> were observed under 1.0, 3.0, and 5.0 kPa O<sub>2</sub> conditions, respectively, marking an increase of 82.0, 83.0, and 84.0 kg/ha<sup>-1</sup> over the ambient condition, which yielded 1,303 kg/ha<sup>-1</sup>. At 15 °C, the 1.0, 3.0, and 5.0 kPa O<sub>2</sub> conditions

increased yields by 91.0, 82.0, and 86.0 kg/ha<sup>-1</sup>, respectively, compared to the ambient condition, which yielded 1,299 kg/ha<sup>-1</sup>.

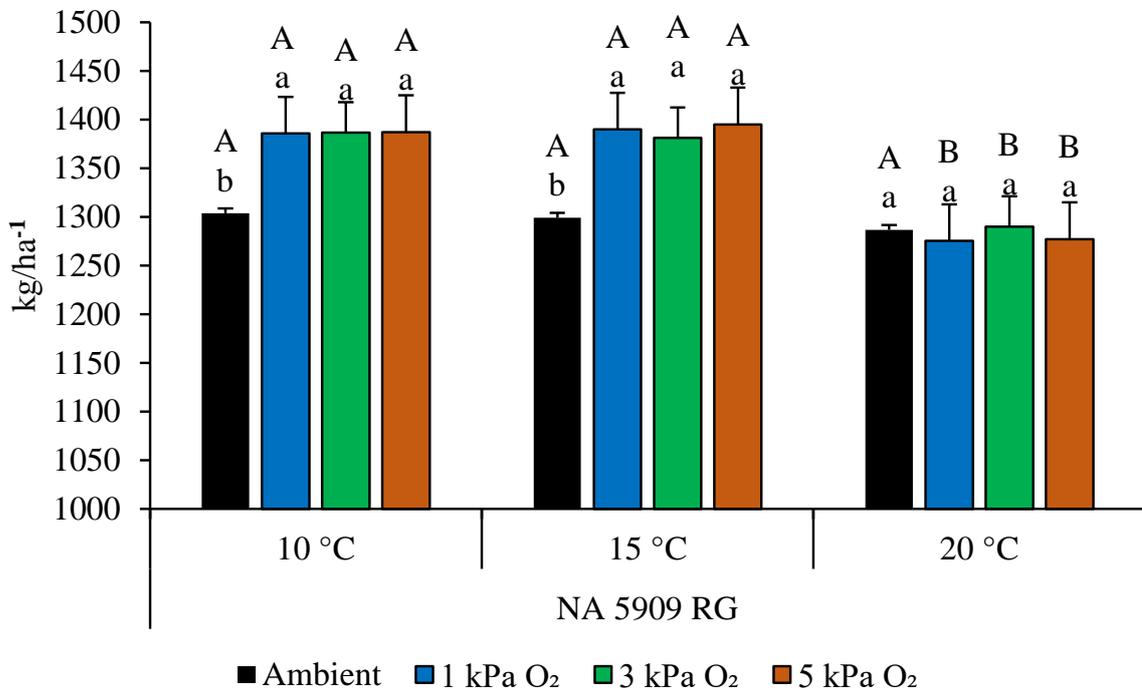


Figure 9b- Productivity of soybean of cultivar NA 5909 RR after storage for 6 months in different temperatures and controlled atmosphere conditions. Bars with the same lower-case letters in the same temperature and bars with the same upper-case letters in different temperatures do not differ by the Scott-Knott test ( $p < 0,05$ ) at 5% probability. Error bars represent standard deviations, Santa Maria, 2022.

This study demonstrates that preserving the physiological quality of seeds stored at 10 °C positively impacts soybean plant growth and development, leading to potential gains in productivity when CA conditions are employed. Evaluating the emergence, plant height, and LAI variables revealed that seeds stored at 10 °C under CA conditions performed better, resulting in higher productivity. This is consistent with Tavares et al. (2013) and Bagateli et al. (2019), who reported higher yields in soybeans using seeds with higher vigor, attributing this to differences in emergence, LAI, and plant height.

### 3.6 Conclusions

Controlled atmosphere storage makes it possible to maintain superior seed physiological quality such as germination, electrical conductivity and seedling length after six months of storage. Elevated storage temperatures, specifically 20 and 25 °C, resulted in diminished activity of the enzymes superoxide dismutase and guaiacol peroxidase. Conversely, seeds stored under CA conditions at 10 °C exhibited lower hydrogen peroxide content and enhanced superoxide dismutase and guaiacol peroxidase activity. These findings indicate superior physiological quality for seeds stored under these specific conditions.

Employing 1.0 kPa O<sub>2</sub> in conjunction with a 10 °C storage temperature significantly preserves the physiological quality of soybean seeds, leading to a measurable increase in productivity compared to seeds stored under ambient conditions. Lastly, the addition of a high concentration of CO<sub>2</sub> in a controlled atmosphere did not yield any additive benefits to low oxygen levels when both were used simultaneously at 10 and 15 °C.

The use of CA can economically benefit the seed industry through greater maintenance of seed quality, making future studies on the operational costs of the hermetic system and the use of CA for soybean cultivars pertinent.

### Funding

This study was supported by the National Council for the National Council For Scientific And Technological Development — CNPQ.

### Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

## Acknowledgments

We would like to thank Department of Agricultural Diagnostics and Research (DDPA) for providing the space and material necessary for this study. We would also like to thank for the fellowships provided and Atlas Assessoria Linguística for language editing.

## 3.7 References

Alencar, E.R., Faroni, L.R.D., Peternelli, L.A., Silva, M.T.C., Costa, A.R., 2010. Influence of soybean storage conditions on crude oil quality. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 14, 303-308. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662010000300010>.

Alencar, E.R., Faroni, L.R.D., Lacerda Filho, A.F., Peternelli, L.A., Costa, A.R., 2009. Qualidade dos grãos de soja armazenados em diferentes condições. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 13, 606-613. <https://doi.org/10.1590/s1415-43662009000500014>.

Amaro, H.T.R., David, A.S.S., Assis, M.O., Rodrigue, B.R.A., Cangussú, L.V.S., Oliveira, M.B., 2015. Testes de vigor para avaliação da qualidade fisiológica de sementes de feijoeiro. *Revista de Ciências Agrárias* 38, 383-389. <https://doi.org/10.19084/rca.16943>.

Amorim, I.P., Silva, J.P.N., Barbedo, C.J., 2023. Germination and regeneration of *Eugenia involucrata* (Myrtaceae) seeds correlated with reactive oxygen species. *Journal of Seed Science* 45, 202345021. <https://doi.org/10.1590/2317-1545v45262916>.

Bagateli, J.R., Dörr, C.S., Schuch, L.O.B., Meneghello, G.E., 2019. Productive performance of soybean plants originated from seed lots with increasing vigor levels. *Journal of Seed Science* 41, 151-159. <http://dx.doi.org/10.1590/2317-1545v41n2199320>.

Bakhtavar, M.A., Afzal, I., 2020. Climate smart Dry Chain technology for safe storage of quinoa seeds. *Scientific Reports* 10, 12554. | <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69190-w>.

Banks, H.J., Annis, P.C., 1990. Comparative advantage of high CO<sub>2</sub> and low O<sub>2</sub> types of controlled atmospheres for grain storage. In: Calderon, M., Barkai-Golan, R. (Ed.), *Food Preservation by Modified Atmospheres*. CRC Press, Boca Raton, pp. 93-122.

Bao, J., Sha, S., Zhang, S., 2011. Changes in germinability, lipid peroxidation, and antioxidant enzyme activities in pear stock (*Pyrus betulaefolia* Bge.) seeds during room- and low-temperature storage. *Acta Physiologiae Plantarum* 33, 2035-2040. <https://doi.org/10.1007/s11738-011-0728-6>

Bartosik, R., Cardoso, L., Rodríguez, J., 2008. Early detection of spoiled grain stored in hermetic plastic bags (silo-bags) using CO<sub>2</sub> monitoring. In: Proceedings of the 8<sup>th</sup> international conference of controlled atmospheres and fumigation of stored products. Sichuan Publishing House of Science and Technology, Chengdu, China, pp. 550-554.

Berghetti, M.R.P., 2020. Qualidade fisiológica e físico-química de grãos e sementes de feijão carioca e feijão preto armazenados em atmosfera controlada em temperaturas elevadas. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria.

Brackmann, A., Neuwald, D.A., Ribeiro, N.D., Freitas, S.T., 2002. Conservação de três genótipos de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) do grupo carioca em armazenamento refrigerado e em atmosfera controlada. *Ciência Rural* 32, 911-915. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782002000600001>

Brasil. 2009. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Regras para análise de sementes, Brasília: MAPA/ACS, pp. 309-316.

Carvalho, E.R., Oliveira, J.A., Von Pinho, E.V.R., Neto, J.C., 2014. Enzyme activity in soybean seeds produced under foliar application of manganese. *Ciência e Agrotecnologia* 38, 317-327. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542014000400001>

Conab – Companhia Nacional de Abastecimento. 2021. Acompanhamento da safra brasileira de grãos. Sexto levantamento. 5, march 2021. Available in: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>. Accessed on 05 January 2022.

Costa, A.R., Faroni, L.R.D., Alencar, E.R., Carvalho, M.C.S., Ferreira, L.G., 2010. Qualidade de grãos de milho armazenados em silos bolsa. *Revista Ciência Agronômica* 41, 200-207. <https://doi.org/10.1590/S1806-66902010000200005>

Delouche, J.C., Baskin, C.C., 1973. Accelerated aging techniques for predicting the relative storability of seeds lots. *Seed Science and Technology* 1, 427-452.

Elias, M.C., 2002. Fatores que influenciam a aeração e o manejo da conservação de grãos. In: Lorini, I., Miike, L.H., Scussel, V.M. (Ed.), *Armazenagem de grãos*, Campinas: IBG, pp. 311-359.

Franco, F. W., 2015. Armazenamento refrigerado, em atmosfera modificada e controlada na conservação das qualidades físico-químicas e sensoriais de cultivares de feijão carioca. 62, dissertação (mestrado em ciências e tecnologia de alimentos), universidade federal de santa maria, santa maria) 2015.

Freitas, R.S., Faroni, L.R.A., Sousa, A.H., 2016. Hermetic storage for control of common bean weevil, *Acanthoscelides obtectus* (Say). *Journal of Stored Products Research* 66, 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2015.12.004>.

Glier, C.A.S., Duarte Júnior, J.B., Fachin, G.M., Costa, A.C.T., Guimarães, V.F., Mrozinski, C.R., 2015. Defoliation percentage in two soybean cultivars at different growth stages. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 19, 567-573. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n6p567-573>.

Groot, S.P.C., Groot, L., Kodde, J., van Treuren, R., 2015. Prolonging the longevity of ex situ conserved seeds by storage under anoxia. *Plant Genetic Resources* 13, 18-26. <https://doi.org/10.1017/S1479262114000586>.

Gutteridge, J.M.C., Halliwell, B., 1990. The measurement and mechanism of lipid peroxidation in biological systems. *Trends in Biochemical Sciences* 15, 129-135. [https://doi.org/10.1016/0968-0004\(90\)90206-Q](https://doi.org/10.1016/0968-0004(90)90206-Q).

Heiffig, L.S., Câmara, G.M.S., Marques, L.A., Pedroso, D.B., Piedade, S.M.S., 2006. Fechamento e índice de área foliar da cultura da soja em diferentes arranjos espaciais. *Bragantia* 65, 285-295. <https://doi.org/10.1590/S0006-87052006000200010>.

Ibro, G., Sorgho, M.C., Idris, A.A., Moussa, B., Baributsa, D., Lowenberg-Deboer, J., 2014. Adoption of cowpea hermetic storage by women in Nigeria, Niger and Burkina Faso. *Journal of Stored Products Research* 58, 87-96. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2014.02.007>.

Kibinza, S., Vinel, D., Come, D., Bailly, C., Corbineau, F., 2006. Sunflower seed deterioration as related to moisture content during ageing, energy metabolism and active oxygen species scavenging. *Physiologia Plantarum* 128, 496–506. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2006.00771.x>.

Kong, F., Chang, S.K.C., 2013. Changes in protein characteristics during soybean storage under adverse conditions as related to tofu making. *Journal of Food Agriculture and Food Chemistry* 61, 387-393. <https://doi.org/10.1021/jf3032606>.

Kong, H., Meng, X., Akram, N.A., Zhu, F., Hu, J., Zhang, Z., 2023. Seed priming with fullerol improves seed germination, seedling growth and antioxidant enzyme system of two winter wheat cultivars under drought stress. *Plants* 12, 1417. <https://doi.org/10.3390/plants12061417>.

Lane, B., Woloshuk, C., 2017. Impact of storage environment on the efficacy of hermetic storage bags. *Journal of Stored Products Research* 72, 83-89. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2017.03.008>.

Ludwig, V., Berghetti, M.R.P., Rossato, F.P., Wendt, L.M., Schultz, E.E., Both, V., Brackmann, A., 2021a. Impact of controlled atmosphere storage on physiological quality of soybean seed. *Journal of Stored Products Research* 90, 101749. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2020.101749>.

Ludwig, V., Berghetti, M.R.P., Ribeiro, S.R., Rossato, F.P., Wendt, L.M., Thewes, F.R., Thewes, F.R., Brackmann, A., Both, V., Wagner, R., 2021b. The effects of soybean storage under controlled atmosphere at different temperatures on lipid oxidation and volatile compounds profile. *Food Research International* 147, 110483. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110483>.

Ludwig, V., 2019. Atmosfera controlada e temperatura de armazenamento na qualidade fisiológica e química de sementes e grãos de soja. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria.

Marcos Filho, J., 2015. Seed vigor testing: an overview of the past, present and future perspective. *Scientia Agricola* 72, 363-374. <https://doi.org/10.1590/0103-9016-2015-0007>

Mittler, R., 2017. ROS are Good. *Trends in Plant Science* 22, 11-19. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2016.08.002>

Murthy, U.M.N., Liang, Y.H., Kumar, P.P., Sun, W.Q., 2002. Nonenzymatic protein modification by the Maillard reaction reduces the activities of scavenging enzymes in *Vigna radiata*. *Physiologia Plantarum* 115, 213-220. <https://doi.org/10.1034/j.1399-3054.2002.1150206.x>

Ochandio, D., Bartosik, R., Gastón, A., Abalone, R., Barreto, A.A., Yommi, A., 2017. Modeling respiration rate of soybean seeds (*Glycine max* (L.)) in hermetic storage. *Journal of Stored Products Research* 74, 36-45. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2017.09.001>.

**PESKE, S. T.; VILLELA, F. A.; MENEGHELLO, G.E. Sementes: fundamentos científicos e tecnológicos. 3ª ed. ed. universitária UFPEL, 2019. PELOTAS. 573 p.**

Quezada, M.Y., Moreno, J., Vázquez, M.E., Mendoza, M., Méndez-Albores, A., Moreno-Martínez, E., 2006. Hermetic storage system preventing the proliferation of *Prostephanus truncatus* horn and storage fungi in maize with different moisture contents. *Postharvest Biology and Technology* 39, 321-326. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2005.10.004>

Richter, G.L., Zanon, A.J., Streck, N.A., Guedes, J.V.C., Kräulich, B., Rocha, T.S.M., Winck, J.E.M., Cera, J.C. 2014. Estimativa da área de folhas de cultivares antigas e modernas de soja por método não destrutivo. *Bragantia* 73, 416-425. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.0179>

Santos, C.M.R.; Menezes, N.L.; Villela, F.A., 2005. Modificações fisiológicas e bioquímicas em sementes de feijão no armazenamento. *Revista Brasileira de Sementes* 27, 104-114. <https://doi.org/10.1590/S0101-31222005000100013>

Scandalios, J. G. (2002). Oxidative stress responses-what have genome-scale studies taught us?. *Genome biology*, v.3. n. 7. p 1-6.

Scheeren, B.R., Peske, S.T., Schuch, L.O.B., Barros, A.C.A., 2010. Qualidade fisiológica e produtividade de sementes de soja. *Revista Brasileira de Sementes* 32, 35-41. <https://doi.org/10.1590/S0101-31222010000300004>.

Schons, A., Silva, C.M., Pavan, B.E., Silva, V., Mielezrski, F., 2018. Genotype responses, seed treatment and storage conditions on physiological potential of soybean seeds. *Revista de Ciências Agrárias* 41, 109-121. <https://doi.org/10.1590/2317-1545v42221062>.

Silva, C.B., Oliveira, N.M., Carvalho, M.E.A., Medeiros, A.D., Nogueira, M.L., Reis, A.R., 2021. Autofluorescence-spectral imaging as an innovative method for rapid, non-destructive and reliable assessing of soybean seed quality. *Scientific Reports* 11, 1-12. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-97223-5>.

Silva, M.G.C., Silva, G.N., Sousa, A.H., Freitas, R.S., Silva, M.S.G., Abreu, A.O., 2018. Hermetic storage as an alternative for controlling *Callosobruchus macula-tus* (Coleoptera: Chrysomelidae) and preserving the quality of cowpeas. *Journal of Stored Products Research* 78, 27-31. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2018.05.010>.

Tavares, L.C., Rufino, C.A., Brunes, A.P., Tunes, L.M., Barros, A.C.S.A., Peske, S.T., 2013. Desempenho de sementes de soja sob deficiência hídrica: rendimento e qualidade fisiológica da geração F1. *Ciência Rural* 43, 1357-1363. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782013000800003>.

Vanzolini, S., Araki, C.A.S., Silva, A.C.T.M., Nakagawa, J., 2007. Teste de comprimento de plântula na avaliação da qualidade fisiológica de sementes de soja. *Revista Brasileira de Sementes* 29, 90-96. <https://doi.org/10.1590/S0101-31222007000200012>.

Wang, Y., Zhu, M., Mei, J., Luo, S., Leng, T., Chen, Y., Nie, S., Xie, M., 2019. Comparison of furans formation and volatile aldehydes profiles of four different vegetable oils during

thermal oxidation. *Journal of Food Science* 84, 1966-1978. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14659>.

Williams, S.B., Baributsa, D., Woloshuk, C., 2014. Assessing Purdue Improved Crop Storage (PICS) bags to mitigate fungal growth and aflatoxin contamination. *Journal of Stored Products Research* 59, 190-196. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2014.08.003>.

Yahaya, A.M., Sinniah, U.R., Misran, A., 2022. Seed quality of lablab beans (*Lablab purpureus* L.) as influenced by drying methods and storage temperature. *Agronomy* 12, 699. <https://doi.org/10.3390/agronomy12030699>.

Zanon, A.J., Streck, N.A., Richter, G.L., Becker, C.C., Rocha, T.S.M., Cera, J.C., Winck, J.E.M., Cardoso, A.P., Taglapietra, E.L., Weber, P.S., 2015. Contribuição das ramificações e a evolução do índice de área foliar em cultivares modernas de soja. *Bragantia* 74, 279-290. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.0463>.

Ziegler, V., Paraginski, R.T., Ferreira, C.D., 2021. Grain storage systems and effects of moisture, temperature and time on grain quality - A review. *Journal of Stored Products Research* 91, 101770. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2021.101770>.

## 4 ARTIGO II

### 4.1 ARMAZENAMENTO EM ATMOSFERA CONTROLADA E EFEITOS NA MANUTENÇÃO DA QUALIDADE FISIOLÓGICA DE SEMENTES E PRODUTIVIDADE DE FEIJÃO

#### RESUMO

AUTOR: Magno Roberto Pasquetti Berghetti

Orientador: Auri Brackmann

A cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) é de grande importância no cenário mundial, principalmente para alimentação humana, fornecendo a base proteica na grande maioria dos países em desenvolvimento. Entretanto, para alcançar alta produtividade e alavancar a produção da cultura, algumas técnicas devem ser melhor estudadas, dentre elas a importância das condições de armazenamento das sementes para manter alta qualidade e a sua produtividade final a campo. O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito de baixas pressões parciais de oxigênio (O<sub>2</sub>) e alta pressão de gás carbônico (CO<sub>2</sub>), combinadas com diferentes temperaturas de armazenamento em atmosfera controlada sobre a manutenção fisiológica de sementes de feijão e seus efeitos sobre a produtividade. No ano de 2020/21, sementes das cultivares Fepagro Triunfo e Fepagro Garapiá foram armazenadas durante oito meses nas seguintes condições: [1] Ambiente; [2] atmosfera controlada (AC) – 1,0 kPa O<sub>2</sub> + 0,04 kPa CO<sub>2</sub>; [3] AC + 15,0 kPa CO<sub>2</sub> nas temperaturas de 10, 15, 20 e 25 °C. No ano de 2021/22, sementes da cultivar F. Triunfo foram armazenadas durante seis meses nas seguintes condições: [1] Ambiente; [2] 1,0 kPa O<sub>2</sub>; [3] 3,0 kPa O<sub>2</sub> e [4] 5,0 kPa O<sub>2</sub> nas temperaturas de 10, 15, e 20 °C. De maneira geral, o aumento da concentração de CO<sub>2</sub> em AC não apresentou efeito aditivo ao baixo O<sub>2</sub> na qualidade das sementes. Sementes armazenadas em temperaturas de 10 °C com a utilização de AC (1,0 kPa O<sub>2</sub>) mantiveram qualidade fisiológica superior com relação a algumas variáveis, apresentando nessa condição menor condutividade elétrica, maior estabilidade no teor de água, menor conteúdo de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, maior atividade das enzimas superóxido dismutase e peroxidase em comparação à temperatura de 25 °C avaliadas durante o armazenamento e também em relação à condição Ambiente. Além disso, a utilização de AC em 10 e 15°C resultou em maior produtividade no campo em comparação à condição Ambiente e maior produtividade em comparação às sementes armazenadas nas temperaturas de 20 e 25 °C. A utilização de AC pode ser aplicada como alternativa na manutenção da qualidade fisiológica de sementes de feijão, em baixas temperaturas como 10 °C e 15°C, assegurando maior produtividade em comparação a sistemas convencionais de armazenamento.

#### Palavras-chave:

*Phaseolus vulgaris*, deterioração, rendimentos de grãos, tecnologia pós-colheita.

## 4.2 INTRODUÇÃO

O feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) possui importância socioeconômica em todo o mundo, e o Brasil destaca-se como o 3º maior produtor e está entre os maiores consumidores do grão (CONAB, 2023; FAO, 2023). Além de gerar renda, a produção de feijão fornece a base proteica e também outros nutrientes, principalmente em países subdesenvolvidos (ELSADR, 2011; YOKOYAMA, 2011; JONES et al., 2011; LOPES et al., 2015). Para alavancar a produtividade, algumas técnicas são necessárias, dentre elas a utilização de sementes de alta qualidade. As sementes após colhidas devem permanecer em condições adequadas de armazenamento afim de garantir a manutenção da qualidade fisiológica, que é o fator determinante para o sucesso da safra posterior.

Durante o armazenamento fatores como temperatura e umidade relativa são cruciais e devem ser ajustadas para redução das perdas de qualidade fisiológica das sementes. Embora as sementes sejam consideradas produtos duráveis devido à possibilidade de reduzir a sua umidade após a colheita, a deterioração é um processo irreversível que ainda ocorre durante o armazenamento, portanto, condições adequadas de armazenamento são necessárias afim de garantir a manutenção da qualidade fisiológica. Estudos sobre o armazenamento de sementes e sua qualidade fisiológica se fazem necessários, pois é um fator determinante no estabelecimento inicial, desenvolvimento e uniformidade das plantas, o que poderá proporcionar maiores produtividades (TAVARES et al., 2013; BAGATELI et al., 2019).

O armazenamento hermético possui grande destaque dentre os estudos atuais, principalmente por possibilitar menores oscilações de umidade interna dos silos, bem como a temperatura do material armazenado. A modificação dos gases e seu controle é um ponto positivo no armazenamento, pois limita a proliferação de pragas, que causam danos irreparáveis ao feijão armazenado (ALENCAR et al., 2010; KONG; CHANG, 2013; SILVA et al., 2018; BAKHTAVAR, 2020). Devido ao fato de não haver trocas gasosas do meio interno do silo ao meio externo, a modificação da atmosfera gasosa nos silos de armazenamento pode ser obtida espontaneamente através do processo respiratório das sementes e organismos existentes, ou com a varredura do O<sub>2</sub>, através da injeção de nitrogênio (N<sub>2</sub>) no ambiente de armazenamento (BARTOSKI et al., 2008; ZIEGLER et al., 2021). Além disso, a redução do O<sub>2</sub> e o aumento da concentração de CO<sub>2</sub> pelo processo respiratório da massa de grãos e sementes possibilita manutenção da qualidade das sementes de feijão (BRACKMANN et al., 2002; ELIAS, 2002; IBRO et al., 2014), milho (COSTA et al., 2010;

WILLIAMS et al., 2014; LANE; WOLOSHUK, 2017) e soja (QUEZADA et al., 2006; LUDWIG et al., 2021a; LUDWIG et al., 2021b).

No armazenamento hermético, há também a possibilidade de realizar o controle da atmosfera do interior dos silos, técnica a qual possibilita bons resultados quanto à manutenção físico-química de grãos e fisiológica de sementes (LUDWIG et al., 2021a; LUDWIG et al., 2021b). A atmosfera controlada (AC) com níveis baixos de O<sub>2</sub> e elevados níveis de CO<sub>2</sub> mostrou-se benéfica na manutenção da coloração clara do tegumento de feijão (tipo carioca) e baixo tempo de cozimento (SILVA et al., 2018) e manutenção da qualidade do óleo em soja (LUDWIG et al., 2021b). Além disso, o armazenamento em AC manteve a qualidade fisiológica de sementes de milho e soja, sendo, por isso, uma técnica promissora para o armazenamento após adequada secagem e controle da temperatura (GROOT et al., 2015; OCHANDIO et al., 2017; SILVA et al., 2018; LUDWIG et al., 2021a; LUDWIG et al., 2021b). Condições atmosféricas com altos níveis de CO<sub>2</sub> e baixos de O<sub>2</sub> reduzem a atividade metabólica e o processo oxidativo, garantindo a preservação das sementes (QUEZADA et al., 2006; KUMAR et al., 2017; BUIJS et al., 2020). A AC, por auxiliar na manutenção da qualidade de sementes, pode ser uma técnica que venha a somar ao armazenamento hermético, podendo reduzir perdas durante armazenamento em empresas, como também aumentar a produtividade das culturas dos produtores rurais (FREITAS et al., 2016; LUDWIG et al., 2021).

Outro fator importante para manutenção da qualidade fisiológica de sementes é a temperatura. A temperatura de armazenamento é considerada um dos fatores-chave que atuam na velocidade e intensidade de perdas da qualidade de sementes e grãos de feijão (SARTORI, 1996). O controle da temperatura tem como objetivo aumentar a manutenção da qualidade inicial das sementes e grãos, além de influenciar a velocidade de reações químicas e metabólicas, onde as reservas contidas nos tecidos são transportadas, transformadas com maior ou menor velocidade durante a germinação, dependendo da temperatura de armazenamento (AGUIAR, 2015).

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito de baixas pressões de O<sub>2</sub> isoladas ou combinadas com elevada pressão parcial de CO<sub>2</sub> associada a diferentes temperaturas de armazenamento na qualidade fisiológica de sementes de feijão após dois, quatro, seis e oito meses de armazenamento, e o efeito dessas condições de armazenamento das sementes na produtividade a campo.

## 4.3 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.3.1 Material experimental e preparação das amostras

O experimento foi conduzido no Núcleo de Pesquisa em Pós-colheita (NPP), no departamento de Fitotecnia da UFSM. Nos anos de 2020 e 2021(1ºano); e 2021 e 2022 (2º ano) os experimentos foram realizados com sementes de feijão da cultivar Fepagro Triunfo e Fepagro Garapiá obtidas do Departamento de Diagnóstico e Pesquisa Agropecuária (DDPA)/centro de pesquisa de sementes, localizado no município de Júlio de Castilhos-RS (Figura 1). Após o armazenamento das sementes, foi realizada a semeadura e condução das parcelas experimentais no DDPA, no município de Júlio de Castilhos-RS.



Figura 4- Mapa de localização experimental. Municípios de Santa Maria e Júlio de Castilhos –RS, Brasil,2021.

Após a chegada das sementes ao NPP, foi realizada a determinação do teor de água inicial, e lotes com teor de umidade maior que 12,0 % passaram por secagem com ar forçado. A temperatura do ar introduzido na massa de sementes foi de 35 °C, até chegar no teor de umidade de aproximadamente 11,5 %. Após a secagem foi realizado a pesagem e homogeneização das amostras experimentais de 1,0 kg de sementes.

### 4.3.2 Estabelecimento e monitoramento da atmosfera controlada

As sementes foram armazenadas em silos herméticos de metal com volume de 24 L. Para a obtenção das condições de atmosfera, foi realizado a diluição da pressão parcial de oxigênio ( $O_2$ ), através da injeção de nitrogênio ( $N_2$ ) nos silos, proveniente de um gerador de  $N_2$ , que funciona pelo princípio “*Pressure Swing Adsorption*” (PSA). A pressão parcial de  $CO_2$  foi obtida através da injeção do gás de um cilindro de alta pressão de  $CO_2$ . Duas vezes por semana foi realizada a determinação e correções das pressões parciais dos gases no interior dos silos, com auxílio do analisador de gases marca Siemens, modelo Ultramat-23. Os silos foram alocados no interior de câmaras frigoríficas com temperaturas de 10, 15, 20 e 25 °C (1ºano) e temperaturas de 10, 15 e 20°C (2ºano). As temperaturas foram controladas automaticamente por termostatos eletrônicos e diariamente monitoradas com termômetros de mercúrio. As sementes foram armazenadas durante oito meses (1ºano experimental) e seis meses (2ºano experimental). As condições de atmosfera utilizadas durante o armazenamento foram: (1) 20,9 kPa  $O_2$  + 0,04kPa  $CO_2$ ; (2) 1 kPa  $O_2$  + 0,04kPa  $CO_2$ ; (3) 1 kPa  $O_2$  + 15,0 kPa  $CO_2$  (1º ano) e (1) 20,9 kPa  $O_2$  + 0,04kPa  $CO_2$ ; (2) 1 kPa  $O_2$  + 0,04kPa  $CO_2$ ; (3) 3 kPa  $O_2$  + 0,04 kPa  $CO_2$  e (4) 5 kPa  $O_2$  + 0,04 kPa  $CO_2$  (2º ano).

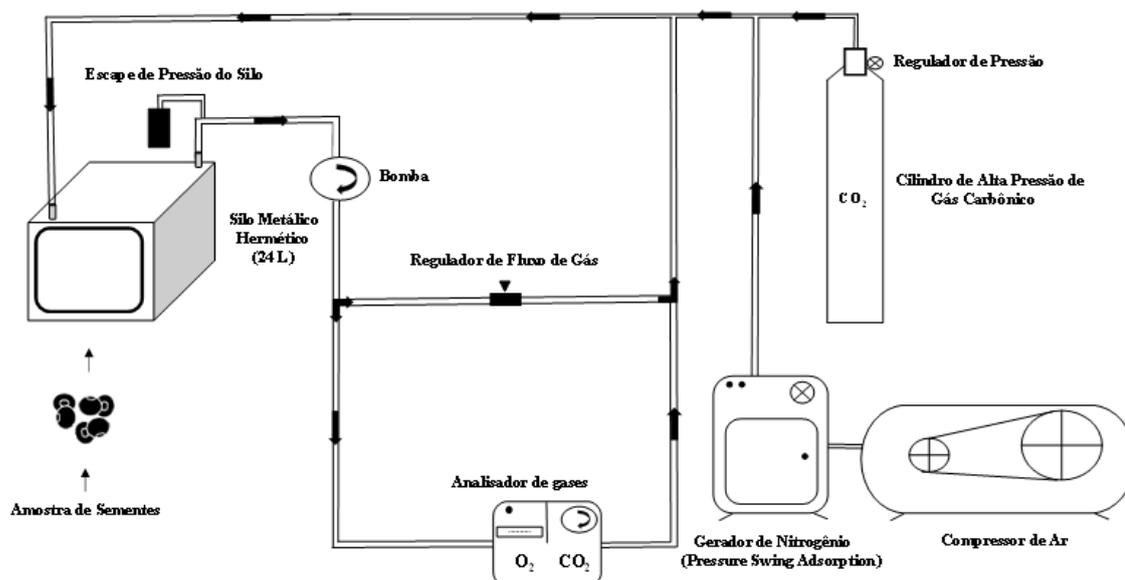


Figura 2-Esquema de instalação da atmosfera (O<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub>) através do gerador de nitrogênio e cilindro de alta pressão de gás carbônico, Santa Maria, 2023.

### 3.4 Variáveis analisadas

#### 3.4.1 Teor de água

A avaliação do teor de água das sementes seguiu as recomendações da regra de análise de sementes (RAS), sendo realizada através de um medidor de umidade calibrado, marca GEHAKA<sup>®</sup>, modelo G600, sendo o valor expresso em porcentagem (BRASIL, 2009).

#### 3.4.2 Perda de massa

A perda de massa foi determinada no segundo ano de experimento através da pesagem das amostras experimentais que continham 1,0 kg de sementes. As amostras de cada condição de armazenamento foram pesadas a cada dois meses até o final do armazenamento, quando foi determinada a perda de massa final das amostras, expressa em gramas.

#### 3.4.3 Condutividade elétrica

Determinada com quatro repetições de 50 sementes de feijão, pesadas e colocadas em copos plásticos de 200 mL, nos quais foram adicionados 75 mL de água destilada. Após os copos foram colocados em uma câmara climatizada com temperatura de 25°C, durante 24 horas e então determinada a condutividade elétrica da solução que conteve as sementes. A leitura foi realizada com um condutivímetro digital da marca ASKO<sup>®</sup> modelo EC Basic AK51. Os dados foram expressos em  $\mu\text{S cm}^{-1} \text{ g}^{-1}$  de semente

### **3.4.4 Teste de germinação**

O teste de germinação foi realizado em quatro repetições de 50 sementes. As sementes foram colocadas sobre duas folhas de papel germitest e, posteriormente, cobertas por uma terceira folha, ambas previamente embebidas em água destilada (2,5 vezes o peso do papel). As sementes foram espalhadas uniformemente no papel, que depois foi enrolado. As amostras foram mantidas na temperatura de  $25^{\circ}\text{C} \pm 1.0^{\circ}\text{C}$ , com fotoperíodo de 12 h de claridade e 12 h de escuridão. A determinação do número de plântulas normais foi realizada no 5º e 9º dias após a instalação do teste (BRASIL, 2009). Os resultados foram expressos em porcentagem de plântulas normais.

### **3.4.5 Comprimento de plântulas e Massa seca de plântulas**

Comprimento de plântulas: Foram utilizadas 25 plântulas normais (amostra) retiradas do teste padrão de germinação e, com um paquímetro, foi realizada a mensuração do comprimento total de plântulas. Os dados foram expressos em centímetros.

Massa seca de plântulas: Após a retirada do cotilédone, as amostras foram levadas a uma estufa de circulação de ar forçado, na temperatura de  $60^{\circ}\text{C}$ , onde foram mantidas até atingir peso constante. Após, as amostras foram retiradas e pesadas em balança com resolução de 0,001 g. Os dados foram expressos em g de matéria seca por amostra.

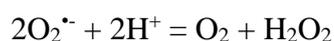
### **3.4.6 Conteúdo de peróxido de hidrogênio e atividade das enzimas antioxidantes (SOD e POD)**

O conteúdo de peróxido de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) foi determinado de acordo com Loreto; Velikova (2001), onde 0,3 g de amostras das sementes foram homogeneizadas em 3 mL de 0,1% de ácido tricloroacético (w/v). O homogeneizado foi centrifugado a  $12.000 \times g$  por 15 minutos a  $4^{\circ}\text{C}$ . Após isso, 0,5 mL do sobrenadante foi adicionado em 0,5 mL de 10 mM de tampão fosfato de potássio (pH 7,0) e 1 mL de 1M KI. A concentração de  $\text{H}_2\text{O}_2$  do sobrenadante foi avaliada comparando suas absorvâncias a 390 nm com uma curva padrão de calibração. A concentração de  $\text{H}_2\text{O}_2$  foi expressa como  $\mu\text{mol g}^{-1}$  de massa fresca.

Atividade das enzimas guaiacol peroxidase (POD) e superóxido dismutase (SOD): 0,5 grama das amostras foi homogeneizado em 3 mL de tampão fosfato de sódio (pH 7,8) - 0,05 M, contendo 1 mM de EDTA e 2% (w/v) de polivinilpirrolidona (PVP). O homogeneizado foi

centrifugado a 13.000 x g por 20 minutos a 4°C e o sobrenadante foi usado para a determinação das enzimas antioxidantes (ZHU et al., 2004). A atividade das peroxidases não específicas presentes no extrato foi determinada segundo Zeraik et al. (2008), utilizando-se o guaiacol como substrato. A atividade da enzima foi medida através da oxidação do guaiacol a tetraguaiacol através do aumento na absorbância a 470 nm. Os resultados foram expressos em unidade de enzima por mg de proteína (U mg<sup>-1</sup> proteína). Para o cálculo, foi utilizado o coeficiente de extinção molar de 26,6 mM<sup>-1</sup> cm<sup>-1</sup>.

A atividade da enzima superóxido dismutase (SOD) foi determinada de acordo com o método espectrofotométrico descrito por Giannopolitis; Ries (1977). Uma unidade de SOD foi definida como a quantidade de enzima que inibe a fotorredução do NBT em 50% (BEAUCHAMP; FRIDOVICH, 1971). No ensaio, a riboflavina fotoquimicamente excitada é reduzida pela metionina em semiquinona, que doa um elétron ao oxigênio, formando o radical superóxido que, por sua vez, converte NBT em formazana azul. A superóxido dismutase catalisa a seguinte reação:



### 3.4.7 Parcelas experimentais

No primeiro ano no experimento a campo, a semeadura foi realizada no DDPA, no município de Júlio de Castilhos-RS, com auxílio de uma semeadora SEMEATO<sup>®</sup> modelo SHP 249, com quatro linhas de semeadura espaçadas 0,5 m. Cada parcela tinha o comprimento de 5,0 metros, totalizando 10 m<sup>2</sup>/parcela. A densidade de semeadura foi de 15 sementes/metro linear totalizando uma densidade de 30 plantas/m<sup>2</sup>, semeadas a 5,0 cm de profundidade. A área útil de colheita foi de 5,0 m<sup>2</sup> pertencentes as duas linhas centrais de cada parcela utilizada posteriormente para a estimativa de produtividade.

No segundo ano experimental, a semeadura foi realizada no Grupo de Pesquisa em Ecofisiologia e Manejo de Culturas Anuais (GEMCA), no município de Santa Maria, realizando-se a semeadura manualmente, em um espaçamento de 0,5 m cada linha numa parcela com um comprimento de 5,0 metros, totalizando 10 m<sup>2</sup>/parcela. A densidade de semeadura foi de 15 sementes/metro linear totalizando uma densidade de 30 plantas/m<sup>2</sup>, semeadas a 5,0 cm de profundidade. A área útil de colheita foi de 5,0 m<sup>2</sup> pertencentes as duas linhas centrais de cada parcela, utilizada posteriormente para a estimativa de produtividade.

### 3.4.8 Emergência a campo

A emergência a campo foi avaliada após 21 dias da data da semeadura, quando foram contabilizados o total de plântulas emergidas de cada repetição. Considerou-se planta emergida aquela que possuía a alça cotiledonar exposta. Os resultados foram expressos em número de plantas/m<sup>2</sup> (BRASIL, 2009).

### 3.4.9 Índice de área foliar

O índice de área foliar (IAF) foi determinado conforme o método proposto por Toebe et al. (2012), o qual estima a área foliar pelo método não destrutivo. Foi realizado a medição de uma planta por repetição. Foi mensurado o comprimento (C) e largura (L) de cada folíolo central dos trifólios nos estádios fenológicos V2, V7, R1 e R5 segundo a escala de Fehr; Caviness (1977). A equação geral utilizada para calcular a área foliar foi:  $AF = 2,025 * (C * L)$ .

#### 3.4.9.1 Produtividade

Para estimativa de produtividade, foram colhidos 5 m<sup>2</sup> de plantas pertencentes às duas linhas centrais de cada parcela experimental, que apresentava um total de 10 m<sup>2</sup>. Após colhido, o material passou por trilha e classificação e posterior pesagem. A produtividade foi corrigida utilizando como referência a umidade de 13% do grão.

### 3.5 Análise estatística

Os experimentos de armazenamento foram conduzidos em delineamento inteiramente casualizado e analisados em esquema fatorial (3 condições de armazenamento x 4 temperaturas de armazenamento (1ºano) e 4 condições de armazenamento x 3 temperaturas de armazenamento (2ºano) com quatro repetições de 1 kg de sementes cada. Para as variáveis analisadas a campo, foi adotado o delineamento blocos ao acaso com os mesmos fatores de condições de armazenamento e temperatura. Os dados foram testados quanto à normalidade dos erros e homogeneidades das variâncias residuais e submetidos à análise de variância ANOVA ( $p < 0,05$ ). Para comparação de médias foi utilizado o teste Scott-Knott com o software estatístico SISVAR<sup>®</sup>.

## 3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.5.1 Condutividade elétrica

O vigor de uma semente pode ser facilmente avaliado através do método da condutividade elétrica (CE), dentre os sistemas existentes. Além disso, o sistema hermético tem se mostrado promissor para o armazenamento tanto para grãos como para sementes e, junto com o uso de atmosfera controlada (AC), pode colaborar no avanço tecnológico para manutenção da qualidade de sementes e, conseqüentemente, seus efeitos sobre a produtividade das culturas (SILVA et al., 2018; LUDWIG et al., 2021a).

A CE apresentou diferença significativa entre as condições de armazenamento, aos seis e oito meses para a cultivar F. Triunfo (Figura 2a). Aos seis meses, a condição com 1,0 kPa O<sub>2</sub> sob temperaturas de 10, 15 e 20 °C, apresentou menor CE em comparação às condições Ambiente e 1,0 kPa O<sub>2</sub> + 15,0 kPa CO<sub>2</sub> nas mesmas temperaturas testadas. Aos oito meses, sementes armazenadas na condição de 1,0 kPa O<sub>2</sub> apresentaram menor CE em comparação às demais condições de armazenamento, independentemente da temperatura de armazenamento (10, 15, 20 e 25 °C). As diferentes temperaturas de armazenamento afetaram a CE apenas na condição com 1,0 kPa O<sub>2</sub> + 15,0 kPa CO<sub>2</sub> aos oito meses de armazenamento, em que as temperaturas de 10 e 15 °C apresentaram menor CE, quando comparado a 20 e 25 °C (Figura 2a).

Para a cultivar F. Garapiá, houve diferenças na CE aos quatro, seis e oito meses de armazenamento (Figura 2b). Aos quatro e seis meses, sementes armazenadas em Ambiente, nas quatro temperaturas testadas, apresentaram maior CE em comparação às condições de 1,0 kPa O<sub>2</sub> e 1,0 kPa O<sub>2</sub> + 15,0 kPa CO<sub>2</sub>. Aos oito meses, a condição Ambiente sob temperatura de 25 °C apresentou maior CE em relação às condições de 1,0 kPa O<sub>2</sub>, 1,0 kPa O<sub>2</sub> + 15,0 kPa CO<sub>2</sub> e as temperaturas de 10, 15 e 20 °C. As diferentes temperaturas de armazenamento não afetaram a CE nas condições de AC (Figura 2b).

No segundo ano, nas condições testadas para a cultivar F. Triunfo, observou-se diferenças aos seis meses de armazenamento. Sementes armazenadas nas condições Ambiente, 1,0 kPa O<sub>2</sub> e 3,0 kPa O<sub>2</sub> sob temperatura de 20 °C apresentaram maior CE em relação às temperaturas de 10 e 15 °C. A condição de 5,0 kPa O<sub>2</sub> na temperatura de 10 °C apresentou sementes com menor CE em relação às temperaturas de 15 e 20 °C. Entre as condições de armazenamento, notou-se diferenças na temperatura de 10 e 15 °C na condição

de 1,0 kPa O<sub>2</sub>, em que sementes armazenadas nessas temperaturas apresentaram menor CE em relação às demais condições testadas (Figura 4a).

Os primeiros sinais de deterioração de sementes podem ser relacionados às alterações nas membranas celulares, sendo que essas alterações podem ser observadas através do aumento da quantidade de lixiviados durante a embebição, podendo reduzir o vigor das sementes (DELOUCHE; BASKIN. 1973; SANTOS et al., 2005; WANG et al., 2019). Condições de AC propiciam a menor alteração nas estruturas da parede celular, havendo menor liberação de lixiviados durante o processo de germinação em comparação a condições sem o controle da atmosfera e, com isso, menos CE (SANTOS et al., 2005). Resultados semelhantes aos observados neste estudo foram encontrados utilizando atmosfera controlada em feijão e soja, onde o armazenamento na temperatura de 20 °C apresentou menor CE em comparação às condições de atmosfera controlada nas temperaturas de 25 e 30 °C, sendo que a maior CE foi observada na condição Ambiente em relação às condições de AC, após sete meses de armazenamento (BERGHETTI, 2020; LUDWIG,2019; LUDWIG et al., 2021a).

Para a cultivar F. Triunfo, a variável peso de mil sementes (PMS) apresentou diferenças aos seis e oito meses. Após seis meses, nas três condições de armazenamento (Ambiente, 1,0 kPa O<sub>2</sub> e 1,0 kPa O<sub>2</sub> + 15,0 kPa CO<sub>2</sub>), o maior PMS foi observado na temperatura de 10 °C comparado às temperaturas de 15, 20 e 25 °C, sendo que não ocorreu diferença entre as condições de armazenamento em cada temperatura testada (Figura 2a). Aos oito meses, não houve diferença entre as temperaturas nas condições de 1,0 kPa O<sub>2</sub> e 1,0 kPa O<sub>2</sub> + 15,0 kPa CO<sub>2</sub>. Entretanto, sementes armazenadas em Ambiente sob temperatura de 25 °C apresentaram menor PMS em relação às condições de 1,0 kPa O<sub>2</sub> e 1,0 kPa O<sub>2</sub> + 15,0 kPa CO<sub>2</sub> para esta temperatura (Figura 2a). Para a cultivar F. Garapiá, houve diferenças aos oito meses de armazenamento para a condição Ambiente, onde as temperaturas de 15 e 20 °C apresentaram o maior PMS comparado às temperaturas de 10 e 25 °C, sendo que as temperaturas (10, 15, 20 e 25 °C) não apresentaram efeito quando as sementes foram armazenadas com 1,0 kPa O<sub>2</sub> e 1,0 kPa O<sub>2</sub> + 15,0 kPa CO<sub>2</sub>. Sementes armazenadas com 1,0 kPa O<sub>2</sub> e 1,0 kPa O<sub>2</sub> + 15,0 kPa CO<sub>2</sub> a 10 e 25 °C apresentaram maior PMS quando comparada a estas mesmas temperaturas na condição Ambiente (Figura 2b).

Variáveis	Meses	AMBIENTE				1 kPa O <sub>2</sub>				1 kPa O <sub>2</sub> + 15 kPa CO <sub>2</sub>				DMS	Legenda			
		10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C					
Condutividade elétrica ( $\mu\text{S cm}^{-1} \text{g}^{-1}$ )	0													18,65	62		141,84	
	2	ns*												49,22				
	4	ns*												47,45				
	6	Aa	Aa	Aa	Aa	Bb	Bb	Bb	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	54,9				
	8	Aa	Aa	Aa	Aa	Ba	Ba	Ba	Ba	Ab	Ab	Aa	Aa	41,21				
Peso de mil sementes (g)	0													12,22	203,79		234,19	
	2	ns*												6,87				
	4	ns*												7,13				
	6	Aa	Ab	Ab	Ab	Aa	Ab	Ab	Ab	Aa	Ab	Ab	Ab	6				
	8	Aa	Aa	Aa	Bb	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	9,71				
Teor de água (%)	0													0,14	10,5		12	
	2	Ab	Ab	Aa	Ab	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	0,24				
	4	Ab	Ab	Aa	Ab	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	0,25				
	6	Bb	Bb	Aa	Bb	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	0,18				
	8	Bb	Bb	Aa	Bb	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	0,13				
Germinação (%)	0													2,17	77		92,5	
	2	ns*												3,3				
	4	Aa	Ab	Ab	Ab	Aa	Aa	Aa	Ab	Aa	Aa	Aa	Ab	2,3				
	6	Aa	Aa	Aa	Ab	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Ab	2,82				
	8	Aa	Aa	Aa	Ab	Aa	Aa	Aa	Ab	Aa	Aa	Aa	Ab	2,81				

Figura 2a- Condutividade elétrica, peso de mil sementes, teor de água e germinação de feijão cv. Fepagro Triunfo armazenado em atmosfera controlada (AC) durante dois, quatro, seis e oito meses nas temperaturas de 10, 15, 20 e 25 °C. Quadrados com letras minúsculas e maiúsculas iguais não diferem, respectivamente, entre as temperaturas na mesma condição e entre as mesmas temperaturas nas três condições pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ). \*DMS= Diferença mínima significativa.

Os resultados obtidos neste estudo, estão relacionados com o equilíbrio higroscópico da semente, que, em condições onde não há hermeticidade e controle de trocas gasosa, temperatura e umidade relativa possibilita que o peso das sementes a oscile com maior intensidade. Na literatura, trabalhos demonstram que silos herméticos reduziram as oscilações quanto ao teor de água, trocas gasosas e consequentemente maior estabilidade com o peso de grãos de feijão e soja armazenados, vindo de encontro com o presente estudo (BARTOSIK et al., 2008; FRANCO, 2015).

### 3.5.2 Teor de água

Silos herméticos podem ser considerados uma estratégia de armazenamento por manterem constante a umidade intergranular da semente, sem que ocorram flutuações durante o tempo de armazenamento, mantendo sua qualidade (BARTOSIK et al., 2008). O teor de água (TA) para a cultivar F. Triunfo não foi influenciado pelas temperaturas avaliadas nas condições 1,0 kPa O<sub>2</sub> e 1,0 kPa O<sub>2</sub> + 15,0 kPa CO<sub>2</sub> durante todo o período de armazenamento, ademais, não apresentou diferenças entre as condições de armazenamento em cada

temperatura avaliada após dois e quatro meses de armazenamento. Entretanto, sementes na condição Ambiente, após dois, quatro, seis e oito meses, na temperatura de 20°C, apresentaram maior TA em relação às demais temperaturas (10, 15 e 25 °C). Além disso, sementes armazenadas em Ambiente nas temperaturas de 10, 15 e 25 °C apresentaram menor TA em comparação às condições de 1,0 kPa O<sub>2</sub> e 1,0 kPa O<sub>2</sub> + 15,0 kPa CO<sub>2</sub> nas mesmas temperaturas (Figura 2a).

Para a cultivar F. Garapiá, da mesma forma que na cv. F. Triunfo, não houve diferenças no TA para sementes armazenadas em 1,0 kPa O<sub>2</sub> e 1,0 kPa O<sub>2</sub> + 15,0 kPa CO<sub>2</sub> independentemente da temperatura de armazenamento, durante todo o período de armazenamento (Figura 2b). Entretanto, houve diferenças entre as temperaturas de armazenamento na condição Ambiente, sendo que a temperatura de 15 e 20 °C apresentaram maior TA aos quatro, seis e oito meses de armazenamento. Além disso, sementes armazenadas nas condições com 1,0 kPa O<sub>2</sub> e 1,0 kPa O<sub>2</sub> + 15,0 kPa CO<sub>2</sub> nas temperaturas de 10 e 25 °C apresentaram maior TA, quando comparadas à condição Ambiente nas mesmas temperaturas (Figura 2b).

No segundo ano experimental com a cultivar F. Triunfo, observou-se diferenças apenas aos dois meses de armazenamento no TA (Figura 4a). Novamente, nas condições herméticas de armazenamento (1,0 kPa O<sub>2</sub>, 3,0 kPa O<sub>2</sub> e 5,0 kPa O<sub>2</sub>) não ocorreram diferenças entre as temperaturas avaliadas (10,15 e 20 °C). Para a condição Ambiente, sementes armazenadas nas temperaturas de 10 e 15 °C apresentaram menor TA em relação às sementes armazenadas em 20 °C. Além disso, sementes armazenadas nas temperaturas de 10 e 15 °C em condição Ambiente apresentaram menor TA em comparação às condições de 1,0, 3,0 e 5,0 kPa O<sub>2</sub> nas mesmas temperaturas (Figura 4a). De maneira geral, as condições herméticas de armazenamento mantiveram constante o TA ao longo do armazenamento, corroborando com Alencar et al. (2009) e Schons et al. (2018) que também relataram a manutenção do TA após 180 dias de armazenamento hermético de sementes de soja.

Os resultados obtidos, demonstram de maneira geral que a AC independente da temperatura testada, manteve os teores de água quando comparado à condição Ambiente, na qual houve variações ao longo do armazenamento. Resultados estes demonstram a eficácia do sistema hermético juntamente com a associação de condições de AC em manter em níveis estáveis teores de água, ajustando de forma homogênea o equilíbrio higroscópico da semente. Isto ocorre porque nos sistemas herméticos as trocas gasosas e mudança na temperatura e umidade do meio interno do silo com o meio externo são reduzidas, podendo favorecer a manutenção da qualidade fisiológica das sementes.

### 3.5.3 Teste padrão de germinação

A germinação durante o armazenamento para a cultivar F. Triunfo demonstrou que houve menor percentual de germinação na condição de 1,0 kPa O<sub>2</sub> aos quatro e oito meses, sob temperatura de 25 °C, em relação às demais temperaturas nessa condição de AC. A condição de 1,0 kPa O<sub>2</sub> + 15,0 kPa CO<sub>2</sub> sob 25 °C apresentou menor germinação aos dois, quatro e seis meses de armazenamento em relação à condição Ambiente e de 1,0 kPa O<sub>2</sub>. Na condição Ambiente, aos quatro meses, a maior germinação foi observada na temperatura de 10 °C e aos seis e oito meses os menores percentuais de germinação foram observados na temperatura de 25 °C (Figura 2a).

Para a cv. F. Garapiá, sementes armazenadas em 1,0 kPa O<sub>2</sub> na temperatura de 15, 20 e 25°C aos dois meses, apresentaram menor percentual de germinação em relação à temperatura de 10 °C. Esse resultado também foi observado na temperatura de 25 °C aos seis meses de armazenamento. Aos quatro e oito meses, não houve diferenças no percentual de germinação entre as condições de atmosfera testadas (Figura 2b). A condição 1,0 kPa O<sub>2</sub> + 15,0 kPa CO<sub>2</sub> sob 25 °C apresentou menor percentual de germinação aos dois e quatro meses de armazenamento, e aos seis meses nas temperaturas de 20 e 25 °C, quando comparado com à temperatura de 10 °C. Além disso, o armazenamento de 1,0 kPa O<sub>2</sub> + 15,0 kPa CO<sub>2</sub> associado a 20 e 25 °C, aos seis meses, apresentou menor germinação quando comparada às condições Ambiente e 1,0 kPa O<sub>2</sub> nas mesmas temperaturas (Figura 2b).

Sementes armazenadas em Ambiente apresentaram maiores percentuais de germinação aos dois e seis meses nas temperaturas de 10, 15 e 20 °C, aos quatro meses nas temperaturas de 10 e 15°C, e aos oito meses não ocorreu diferença entre as temperaturas avaliadas. Aos quatro meses, sementes armazenadas nas temperaturas de 20 e 25 °C associada à condição Ambiente apresentaram menor germinação em comparação às condições com 1,0 kPa O<sub>2</sub> e 1,0 kPa O<sub>2</sub> + 15,0 kPa CO<sub>2</sub> nas mesmas temperaturas. Sendo que, após seis meses de armazenamento, sementes armazenadas com 1,0 kPa O<sub>2</sub> + 15,0 kPa CO<sub>2</sub> nas temperaturas de 20 e 25 °C apresentaram menor germinação, quando comparado às condições Ambiente e 1,0 kPa O<sub>2</sub>. Aos oito meses, sementes armazenadas na condição com 1,0 kPa O<sub>2</sub> sob temperatura de 10 °C apresentaram maior germinação em relação às condições Ambiente e com 1,0 kPa O<sub>2</sub> + 15,0 kPa CO<sub>2</sub> (Figura 2b).

Variáveis	Meses	AMBIENTE				1 kPa O <sub>2</sub>				1 kPa O <sub>2</sub> + 15 kPa CO <sub>2</sub>				DMS	Legenda			
		10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C		Mínimo	Máximo		
Condutividade elétrica (µS cm <sup>-1</sup> g <sup>-1</sup> )	0	ns*												2,82	62		121,3	
	2	ns*												4,04				
	4	Aa	Aa	Aa	Aa	Ba	Ba	Ba	Ba	Ba	Ba	Ba	Ba	5,73				
	6	Aa	Aa	Aa	Aa	Ba	Ba	Ba	Ba	Ba	Ba	Ba	Ba	4,63				
	8	Ab	Ab	Ab	Aa	Aa	Aa	Aa	Ba	Aa	Aa	Aa	Ba	4,06				
Peso de mil sementes (g)	0	ns*												1,68	215		240	
	2	ns*												0,9				
	4	ns*												6,8				
	6	ns*												5,2				
	8	Bb	Aa	Aa	Bb	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	4,3				
Teor de água (%)	0	ns*												0,14	10,4		11,8	
	2	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	0,25				
	4	Bb	Aa	Aa	Bb	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	0,42				
	6	Bb	Aa	Aa	Bb	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	0,33				
	8	Bb	Aa	Aa	Bb	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	0,23				
Germinação (%)	0	ns*												3,15	77		96	
	2	Aa	Aa	Aa	Ab	Aa	Ab	Ab	Ab	Aa	Aa	Aa	Ab	2,78				
	4	Aa	Aa	Bb	Bb	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Ab	1,92				
	6	Aa	Aa	Aa	Ab	Aa	Aa	Aa	Ab	Aa	Aa	Bb	Bb	2,13				
	8	Ba	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Ba	Aa	Aa	Aa	2,85				

Figura 2b- Condutividade elétrica, peso de mil sementes, teor de água e germinação de feijão cv. Fepagro Garapiá, armazenado em AC durante seis meses nas temperaturas de 10, 15, 20 e 25 °C. Quadrados com letras minúsculas e maiúsculas iguais não diferem, respectivamente, entre as temperaturas na mesma condição e entre as mesmas temperaturas nas três condições pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ). \*DMS= Diferença mínima significativa.

No segundo ano, para a cultivar F. Triunfo, as sementes armazenadas na condição de 1,0 kPa O<sub>2</sub> associada à temperatura de 10 °C, aos dois, quatro e seis meses, apresentaram maior germinação quando comparado com as temperaturas de 15 e 20 °C. Nas condições Ambiente, 3,0 e 5,0 kPa O<sub>2</sub>, resultado semelhante foi observado principalmente aos seis meses de armazenamento (Figura 4a). Entre as condições de atmosfera para cada temperatura testada houve diferenças significativas aos dois e quatro meses de armazenamento, sendo que sementes armazenadas a 10 °C na condição Ambiente apresentaram menor germinação em relação às três condições de AC. Aos quatro meses, sementes armazenadas a 10 °C na condição com 5,0 kPa O<sub>2</sub> apresentaram menor germinação em relação às condições Ambiente, 1,0 e 3,0 kPa O<sub>2</sub> (Figura 4a). Esses resultados demonstram a importância das temperaturas de armazenamento, sendo que a exposição a altas temperaturas durante o armazenamento aumenta o risco de perda do percentual germinativo das sementes. Paraginski et al. (2015) observaram que sementes de milho armazenadas na temperatura de 35 °C apresentaram menor porcentagem de germinação em relação às temperaturas de 15 e 25 °C, após seis meses de armazenamento, demonstrando que acima de 15 °C há um aumento nos processos metabólicos que reduz o percentual de germinação. Além disso, Ludwig et al. (2021a)

relataram que sementes de soja armazenadas sob temperatura de 20 °C apresentaram maior germinação em comparação à temperatura de 30 °C.

### 3.5.4 Comprimento de plântulas

O comprimento de plântulas (CP) e massa seca de plântulas (MS) são variáveis que expressam o vigor de sementes. O CP, para a cultivar F. Triunfo, após dois meses de armazenamento, não apresentou diferença tanto entre temperaturas quanto entre as condições de armazenamento. Sementes armazenadas na condição com 1,0 kPa O<sub>2</sub> + 15,0 kPa CO<sub>2</sub>, na temperatura de 10 °C, originaram plântulas com maior CP em relação às demais temperaturas testadas, após quatro, seis e oito meses de armazenamento (Figura 3a). Além disso, quando a temperatura de 25 °C é associada à condição com 1,0 kPa O<sub>2</sub> + 15,0 kPa CO<sub>2</sub> resulta em menor CP, quando comparado às condições Ambiente e 1,0 kPa O<sub>2</sub>, após quatro, seis e oito meses de armazenamento. Na condição com 1,0 kPa O<sub>2</sub> aos dois e oito meses de armazenamento não houve diferença significativa entre as temperaturas, sendo que aos quatro meses o maior CP deu-se nas temperaturas de 10 e 15 °C e aos seis meses na temperatura de 10 °C.

Para sementes armazenadas na condição Ambiente, aos dois e quatro meses, não houve diferenças entre as condições de atmosfera testadas. Aos seis meses, sementes armazenadas em 1,0 kPa O<sub>2</sub> e 1,0 kPa O<sub>2</sub> + 15,0 kPa CO<sub>2</sub> a 10°C apresentaram maior CP em comparação à condição Ambiente para essa temperatura. Aos oito meses, na condição Ambiente, o maior CT deu-se nas temperaturas de 15 e 20 °C (Figura 3a).

Variáveis	MESES	AMBIENTE				1 kPa O <sub>2</sub>				1 kPa O <sub>2</sub> + 15 kPa CO <sub>2</sub>				DMS	Legenda			
		10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C					
Comprimento Total Plântulas (cm)	0													0,2	Mínimo	10,18	16,5	Máximo
	2	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	0,65				
	4	Ba	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Ab	Ab	Aa	Ab	Ab	Bb	0,51				
	6	Ba	Aa	Aa	Aa	Aa	Ab	Ab	Ab	Aa	Ab	Ab	Bb	0,71				
	8	Ab	Aa	Aa	Ab	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Ab	Ab	Bb	1,01				
Massa Seca (g)	0													0,01	Mínimo	0,33	0,59	Máximo
	2	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Ab	Ab	Ab	Aa	Ab	Ab	Ab	0,03				
	4	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Ab	Ab	0,04				
	6	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Ab	Ab	Ab	0,06				
	8	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Ab	Ab	0,03				

Figura 3a- Comprimento total e massa seca de plântulas de feijão cv. Fepagro Triunfo obtidas de sementes armazenadas em AC durante seis meses nas temperaturas de 10, 15, 20 e 25 °C. Quadrados com letras

minúsculas e maiúsculas iguais não diferem, respectivamente, entre as temperaturas na mesma condição e entre as mesmas temperaturas nas três condições pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ). \*DMS= Diferença mínima significativa.

Na cv. F. Garapiá, a condição de 1,0 kPa O<sub>2</sub> + 15,0 kPa CO<sub>2</sub>, aos dois meses de armazenamento, apresentou o menor CP na temperatura de 25 °C, sendo que aos quatro, seis e oito meses, as temperaturas de 10 e 15°C apresentaram maior CP em relação às outras temperaturas avaliadas (Figura 3b). Sementes armazenadas em 1,0 kPa O<sub>2</sub> aos dois e quatro meses de armazenamento não apresentaram diferenças no CP entre as diferentes temperaturas. Entretanto, aos seis meses o maior CP deu-se nas temperaturas de 10 e 15 °C e aos oito meses nas temperaturas de 10, 15 e 20 °C. Na condição Ambiente, não houve diferenças entre as temperaturas avaliadas. Contudo, aos dois e quatro meses, sementes armazenadas em Ambiente na temperatura de 10 °C apresentaram menor CP em relação às condições com 1,0 kPa O<sub>2</sub> e 1,0 kPa O<sub>2</sub> + 15,0 kPa CO<sub>2</sub> (Figura 3b).

Variáveis	MESES	AMBIENTE				1 kPa O <sub>2</sub>				1 kPa O <sub>2</sub> + 15 kPa CO <sub>2</sub>				DMS	LEGENDA			
		10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C		Mínimo			Máximo
Comprimento Total Plântulas (cm)	0	ns*												0,83	11		15,8	
	2	Ba	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Ab	0,69				
	4	Ba	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Ab	Ab	0,76				
	6	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Ab	Ab	Aa	Aa	Ab	Ab	0,72				
	8	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Ab	Aa	Aa	Ab	Ab	0,88					
Massa Seca de Plântulas (g)	0	ns*												0,01	0,32		0,5	
	2	Aa	Aa	Aa	Ab	Aa	Aa	Ab	Aa	Aa	Aa	Aa	0,08					
	4	ns*											0,09					
	6	Ba	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Bb	0,07					
	8	Aa	Aa	Aa	Ab	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Bb	0,08					

Figura 3b- Comprimento de plântulas e massa seca de plântulas de feijão cv. Fepagro Garapiá obtidas de sementes armazenadas em AC durante seis meses nas temperaturas de 10, 15, 20 e 25 °C. Quadrados com letras minúsculas e maiúsculas iguais não diferem, respectivamente, entre as temperaturas na mesma condição e entre as mesmas temperaturas nas três condições pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ). \*DMS= Diferença mínima significativa.

O comprimento de plântulas (CP), perda de massa (PM) e massa seca de plântulas (MS) são variáveis que expressam o vigor de sementes. No segundo ano de experimentos, avaliando o comprimento total de plântulas, notou-se que sementes armazenadas na temperatura de 10 e 15 °C originaram plântulas com maior CP em relação à temperatura de 20 °C, quando associada à condição Ambiente e com 1,0 kPa O<sub>2</sub> aos quatro e seis meses de

armazenamento, sendo que após dois meses, as temperaturas e as condições de armazenamento não afetaram o CP. Resultado similar foi encontrado na condição com 3,0 kPa O<sub>2</sub> aos dois e seis meses de armazenamento. Na condição com 5,0 kPa O<sub>2</sub> aos quatro e seis meses de armazenamento, sementes armazenadas na temperatura de 10 °C originaram plântulas com maior CP em relação às temperaturas de 15 e 20 °C. A única condição que diferiu entre as condições de atmosfera avaliadas em cada temperatura foi a de 5,0 kPa O<sub>2</sub> na temperatura de 20°C, apresentando menor CP quando comparada às demais condições de atmosfera avaliadas (Figura 4b).

De maneira geral, podemos destacar os resultados positivos ao comprimento de plântulas, principalmente plântulas advindas de sementes armazenadas em baixas temperaturas e com utilização de AC. Resultados prévios têm mostrado resultados benéficos com a utilização de AC, como os de Aguiar et al. (2015), os quais relataram que elevadas pressões parciais de CO<sub>2</sub> (50,0 kPa) em sementes de arroz resultaram em maior comprimento da parte radicular em comparação à pressão parcial de 0,0 kPa após 45 dias de armazenamento. Além disso, resultados similares aos encontrados no presente estudo foram observados em soja (LUDWIG, 2019) e feijão (BERGHETTI, 2020), onde condições de AC com baixos níveis de O<sub>2</sub> (1,0 kPa O<sub>2</sub> e 1,0 kPa O<sub>2</sub> + 30,0 kPa CO<sub>2</sub>) mantiveram maior comprimento da parte aérea em plântulas provenientes de sementes armazenadas por sete meses em temperaturas de 20, 25 e 30 °C em relação à condição Ambiente.

### 3.5.5 Massa seca

Para a cultivar F. Triunfo, a massa seca (MS) não apresentou diferenças significativas entre as temperaturas avaliadas na condição Ambiente durante todo o período de armazenamento, sendo que na condição com 1,0 kPa O<sub>2</sub> na temperatura de 10 °C resultou em maior MS quando comparada às temperaturas de 15, 20 e 25 °C. No entanto, após quatro, seis e oito meses as temperaturas de armazenamento não afetaram a MS. Aos dois, quatro, seis e oito meses não houve diferenças significativas entre as temperaturas de armazenamento avaliadas. Para a condição de 1,0 kPa O<sub>2</sub> + 15,0 kPa CO<sub>2</sub>, aos dois e seis meses, a maior MS foi observada em plântulas de sementes armazenadas em 10 °C, sendo que aos quatro e oito meses a maior MS deu-se nas temperaturas de 10 e 15 °C (Figura 3a). Além disso, as condições de armazenamento não afetaram a MS, independente da temperatura de armazenamento (10 a 25 °C) ao longo de todo o período de armazenamento (Figura 3a).

Para a cultivar F. Garapiá, aos dois meses, as condições Ambiente e com 1,0 kPa O<sub>2</sub> sob temperatura de 25 °C apresentaram menor MS comparado às temperaturas de 10, 15 e 20 °C, sendo que na condição com 1,0 kPa O<sub>2</sub> + 15,0 kPa CO<sub>2</sub> não houve diferença entre as temperaturas avaliadas. Aos quatro meses, não houve diferenças significativas nas três condições testadas e nas quatro temperaturas avaliadas (Figura 3b). Aos seis e oito meses não houve diferenças para MS de plântulas de sementes armazenadas a 1,0 kPa O<sub>2</sub>. Para a condição de 1,0 kPa O<sub>2</sub> + 15,0 kPa CO<sub>2</sub> aos seis e oito meses, sementes armazenadas na temperatura de 25 °C produziram plântulas com menor MS quando comparado às temperaturas de 10, 15 e 20 °C e às condições Ambiente e com 1,0 kPa O<sub>2</sub>. Para a condição Ambiente, aos seis meses, sementes armazenadas na temperatura de 10 °C produziram plântulas com menor MS em relação às condições com 1,0 kPa O<sub>2</sub> e 1,0 kPa O<sub>2</sub> + 15,0 kPa CO<sub>2</sub> (Figura 3b).

No segundo ano experimental, quando avaliado a variável perda de massa (PM) na cultivar F. Triunfo, observou-se que, após dois e quatro meses, sementes armazenadas na condição Ambiente sob temperatura de 10 °C apresentou menor PM em relação às condições de AC. Aos seis meses, sementes armazenadas a 10 °C nas condições de 1,0 kPa O<sub>2</sub> e 3,0 kPa O<sub>2</sub> apresentaram maior PM em relação a essa mesma temperatura para as condições Ambiente e de 5,0 kPa O<sub>2</sub>. Além disso, a condição de 5,0 kPa O<sub>2</sub> na temperatura de 20 °C apresentou menor PM em comparação às demais condições de armazenamento avaliadas após quatro e seis meses (Figura 4b). Para cada condição de atmosfera avaliada isoladamente observou-se diferença aos quatro e seis meses de armazenamento (Figura 4b). Aos quatro meses, sementes armazenadas na temperatura de 10 °C na condição Ambiente apresentaram menor PM em relação a essa mesma temperatura nas demais condições testadas. Aos seis meses, sementes armazenadas nas temperaturas de 10 e 15 °C apresentaram menor PM em relação a sementes armazenadas na temperatura de 20 °C para as condições Ambiente, 1,0 kPa O<sub>2</sub> e 3,0 kPa O<sub>2</sub>. Não houve diferenças para a condição de 5,0 kPa O<sub>2</sub> entre as temperaturas analisadas (Figura 4b).

Variáveis	Meses	AMBIENTE			1 kPa O <sub>2</sub>			3 kPa O <sub>2</sub>			5 kPa O <sub>2</sub>			DMS	Legenda				
		10 °C	15 °C	20 °C	10 °C	15 °C	20 °C	10 °C	15 °C	20 °C	10 °C	15 °C	20 °C						
		[Grid of data points with letters and background shading]																	
Conductividade elétrica (μS cm <sup>-1</sup> g <sup>-1</sup> )	0													3,8	Mínimo	70	[Color gradient bar]	94	Máximo
	2	ns												5,7					
	4	ns												7,1					
	6	Ab	Ab	Aa	Ab	Bb	Ba	Ab	Ab	Aa	Ab	Aa	Aa	6,5					
Teor de água (%)	0													0,28	Mínimo	11,2	[Color gradient bar]	11,9	Máximo
	2	Bb	Bb	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	0,33					
	4	ns												0,2					
	6	ns												0,24					
Germinação (%)	0													3,2	Mínimo	74	[Color gradient bar]	88	Máximo
	2	Ba	Aa	Aa	Aa	Ab	Ab	Aa	Aa	Ab	Aa	Ab	Ab	3,8					
	4	Aa	Aa	Aa	Aa	Ab	Ab	Aa	Aa	Aa	Ba	Aa	Aa	4,3					
	6	Aa	Ab	Ab	Aa	Ab	Ab	Aa	Ab	Ab	Aa	Ab	Ab	3,5					

Figura 4a- Condutividade elétrica, teor de água e germinação de sementes de feijão cv. Fepagro Triunfo, armazenadas em AC durante seis meses nas temperaturas de 10, 15 e 20 °C. Quadrados com letras minúsculas e maiúsculas iguais não diferem, respectivamente, entre as temperaturas na mesma condição e entre as mesmas temperaturas nas três condições pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ). \*DMS= Diferença mínima significativa.

Analisando-se a massa seca (MS), não foram observadas diferenças entre as condições de temperatura testadas durante o armazenamento. Aos dois meses de armazenamento, foram observadas diferenças entre as temperaturas para a condição de 5 kPa O<sub>2</sub>, sendo que sementes armazenadas em 10 e 15 °C apresentaram maior MS em relação a 20 °C. Aos quatro meses, houve diferença apenas na condição Ambiente, onde sementes armazenadas nas temperaturas de 10 e 15 °C apresentaram maior MS em relação à temperatura de 20 °C. Aos seis meses, sementes armazenadas na temperatura de 10 °C apresentaram maior MS quando comparado com sementes armazenadas nas temperaturas de 15 e 20 °C nas condições de 1,0 kPa O<sub>2</sub>, 3,0 kPa O<sub>2</sub> e 5,0 kPa O<sub>2</sub>, sendo que na condição Ambiente não houve diferenças entre as temperaturas analisadas (Figura 4b). Trabalhos na literatura mostram a relação do vigor de sementes na massa seca de plântulas, apresentando variações de até 30 % superior de MS em plântulas provenientes sementes de alto vigor em relação a plântulas advindas de sementes de baixo vigor (HÖFS et al., 2004; SCHUCH et al. 2000).

Variáveis	Meses	AMBIENTE			1 kPa O <sub>2</sub>			3 kPa O <sub>2</sub>			5 kPa O <sub>2</sub>			DMS	Legenda			
		10 °C	15 °C	20 °C	10 °C	15 °C	20 °C	10 °C	15 °C	20 °C	10 °C	15 °C	20 °C		Mínimo		Máximo	
Perda de massa de sementes (g)	0													5,6	994,5		1000	
	2	Ba	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	4,8				
	4	Ba	Aa	Aa	Aa	Aa	Ab	Ab	Ab	Aa	Aa	Aa	Ba	5,3				
	6	Ba	Aa	Aa	Aa	Aa	Ab	Aa	Aa	Aa	Ba	Ba	Ba	4,2				
Comprimento Total Plântulas	0													0,85	11		16	
	2	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	0,7				
	4	Aa	Aa	Ab	Aa	Aa	Ab	Ab	Ab	Ab	Aa	Ab	Bb	0,53				
	6	Aa	Aa	Ab	Aa	Aa	Ab	Aa	Aa	Ab	Aa	Ab	Bb	0,4				
Massa Seca de Plântulas (g)	0													0,04	0,4		0,61	
	2	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Ab	0,06				
	4	Aa	Aa	Ab	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	0,05				
	6	Aa	Aa	Aa	Aa	Ab	Ab	Aa	Aa	Ab	Aa	Ab	Ab	0,04				

Figura 4b- Perda de massa de sementes, comprimento total de plântulas e massa seca de plântulas de feijão cv. Fepagro Triunfo armazenada em AC durante seis meses nas temperaturas de 10, 15 e 20 °C. Quadrados com letras minúsculas e maiúsculas iguais não diferem, respectivamente, entre as temperaturas na mesma condição e entre as mesmas temperaturas nas três condições pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ). \*DMS= Diferença mínima significativa.

### 3.5.6 Atividade enzimática

O processo de deterioração de sementes pode ser sinalizado a partir de inúmeras variáveis, que podem ser detectadas por análises bioquímicas (CARVALHO et al., 2012; XIE et al., 2019). No presente trabalho, durante o armazenamento de sementes, foram analisadas variáveis bioquímicas que levassem a conclusões sólidas quanto ao efeito do armazenamento em condições de atmosfera controlada (AC). Dentre essas variáveis destacam-se a atividade enzimática da superóxido dismutase (SOD) e guaiacol peroxidase (POD), além do conteúdo de peróxido de hidrogênio (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), espécie reativa de oxigênio (ERO) produzida pelo metabolismo celular.

Observou-se, no primeiro ano de experimento, para a cultivar F. Triunfo, resultados que vão de encontro às variáveis analisadas ao longo do armazenamento. A atividade da SOD e da POD nas condições de AC a 10°C apontam menor processo de deterioração em relação à condição Ambiente (Figura 5a e 5b), principalmente aos oito meses de armazenamento e condiz com o maior comprimento de plântulas e baixa condutividade elétrica sob menor temperatura e a baixa concentração de O<sub>2</sub>. Para a variável H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> houve diferenças significativas na temperatura de 10 °C, onde as condições de AC, aos oito meses de armazenamento, apresentaram menor índice de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, sendo que na temperatura de 25 °C o menor índice de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> foi observado aos quatro e oito meses na condição de 1,0 kPa O<sub>2</sub> comparada às condições Ambiente e 1,0 kPa O<sub>2</sub> + 15,0 kPa (Figura 5c).

Um aumento na quantidade de ERO geralmente é um dos fatores mais importante que afeta o envelhecimento das sementes, sendo que seu aumento, em geral, está associado a sementes armazenadas em condições inadequadas ou por um longo tempo (Bailly, 2004), as quais causam danos oxidativos aos lipídios, proteínas e DNA, levando a uma perda de viabilidade e germinação (RATAJCZAK et al., 2015; ONEL et al., 2017; WASZCZAK et al., 2018). Por outro lado, baixas concentrações de ERO dentro das sementes servem como importantes moléculas sinalizantes para diversos processos metabólicos (APEL e HIRT, 2004; WASZCZAK et al., 2018). Sementes armazenadas na temperatura de 25 °C, na condição de 1,0 kPa O<sub>2</sub> apresentaram maior atividade da SOD e POD em relação às condições com 1,0 kPa O<sub>2</sub> + 15,0 kPa e Ambiente, após oito meses de armazenamento, sendo que aos quatro meses não ocorreu diferença entre as condições de armazenamento (Figura 5a e 5b). As condições Ambiente e com 1,0 kPa O<sub>2</sub> aos quatro meses, juntamente com a condição 1,0 kPa O<sub>2</sub> + 15,0 kPa aos oito meses na temperatura de 25 °C, apresentaram menor atividade da SOD e POD em relação à temperatura de 10°C (Figura 5a e 5b). Entre as temperaturas de armazenamento, para o índice de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, a condição que diferiu estatisticamente foi a de 1,0 kPa O<sub>2</sub> + 15,0 kPa, a qual apresentou menor H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> aos oito meses quando associada à temperatura de 10 °C em relação à temperatura de 25 °C (Figura 5c).

Essa soma de fatores (alta temperatura, adição de CO<sub>2</sub> juntamente ao baixo oxigênio) pode ter causado maior deterioração das sementes armazenadas nessas condições e explicar alguns resultados, onde as sementes não apresentaram boa performance em algumas variáveis de qualidade fisiológica, como o comprimento e massa seca de plântulas e germinação. Isto indica que a combinação da temperatura de 25°C associado ao baixo oxigênio ocasionou maior estresse oxidativo das sementes, aumentando a deterioração em relação às sementes armazenadas em baixo oxigênio isolado, sem adição de CO<sub>2</sub>, e até mesmo na condição Ambiente.

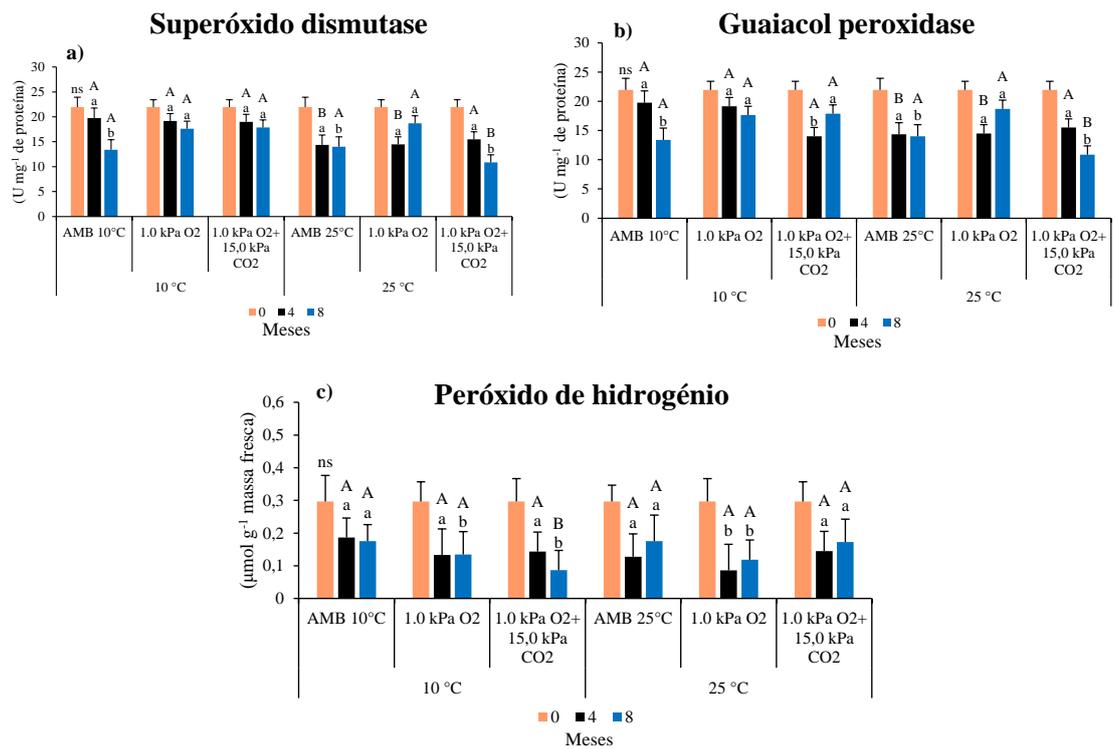


Figura 5- Atividade das enzimas superóxido dismutase-SOD (a) e guaiacol peroxidase-POD (b) e o conteúdo de peróxido de hidrogênio-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (c) de sementes de feijão cv. Fepagro Triunfo armazenadas em AC durante quatro e seis meses nas temperaturas de 10 e 25 °C. Barras com a mesma letra minúsculas e maiúscula não diferem respectivamente entre as condições na mesma temperatura e nas mesmas condições entre temperaturas diferentes pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade de erro. Santa Maria, 2021.

Durante o armazenamento da cultivar F. Garapiá foram observadas diferenças nas variáveis SOD, POD e conteúdo de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (Figura 6). A atividade da SOD foi menor na temperatura de 25 °C comparado com a temperatura de 10 °C, independente da condição de armazenamento, após quatro e oito meses de armazenamento (Figura 6a). Resultado similar foi observado para a POD, principalmente aos oito meses de armazenamento, quando a maior atividade enzimática ocorreu nas condições de atmosfera na temperatura de 10 °C em relação às condições de atmosfera (Ambiente, 1,0 kPa O<sub>2</sub> e 1,0 kPa O<sub>2</sub> + 15,0 kPa) a 25 °C. Além disso, na temperatura de 25 °C, aos quatro meses de armazenamento, a condição Ambiente apresentou menor atividade da POD em relação às condições com 1,0 kPa O<sub>2</sub> e 1,0 kPa O<sub>2</sub> + 15,0 kPa (Figura 6b).

Para a variável H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> houve diferenças significativas entre as temperaturas na condição de 1,0 kPa O<sub>2</sub> + 15,0 kPa na temperatura de 10 °C, apresentando para esta condição menor H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> em relação à temperatura de 25 °C após oito meses de armazenamento. Na

temperatura de 25 °C, as condições Ambiente e com 1,0 kPa O<sub>2</sub> apresentaram menor índice de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> em relação à condição de 1 kPa O<sub>2</sub> + 15,0 kPa (Figura 6c).

Os resultados do primeiro ano de experimento demonstraram coerência às demais variáveis analisadas durante o armazenamento. Condições de AC associadas a baixas temperaturas apresentaram maior SOD e POD e menor H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Carvalho (2014) e Anjum (2015) relatam que o H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> atua como um sinalizador de estresse celular, onde enzimas como SOD e POD atuam reduzindo o H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> no meio celular, ou seja, quanto maior a atividade da SOD e POD e menor o valor de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, então podemos inferir que essas sementes sofrem um menor processo de deterioração. Nesse contexto, as atividades das enzimas antioxidantes podem atuar no controle da homeostase do tecido por eliminação de ERO (POSMYK et al., 2008) durante o processo de armazenamento. Além disso, um bom sistema de defesa antioxidante pode ser especialmente importante durante a germinação, uma vez que a atividade metabólica intensifica e pode gerar um desequilíbrio de ERO (BARBOSA et al., 2023).

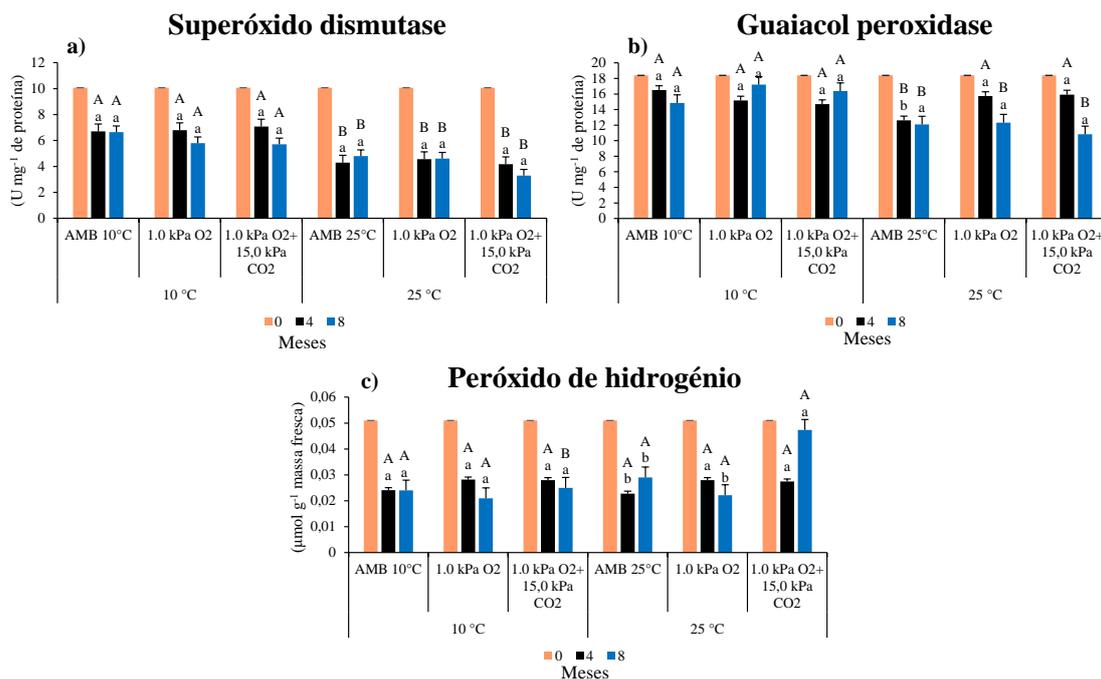


Figura 6- Atividade das enzimas superóxido dismutase-SOD (a) e guaiacol peroxidase-POD (b) e o conteúdo de peróxido de hidrogênio-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (c) de sementes de feijão cv. Fepagro Garapiá armazenadas em AC durante quatro e seis meses nas temperaturas de 10 e 25 °C. Barras com a mesma letra minúscula e maiúscula não diferem respectivamente entre as condições na mesma temperatura e nas mesmas condições entre temperaturas diferentes pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade de erro. Santa Maria, 2021.

No segundo ano de experimento, para a cultivar F. Triunfo, observou-se que na temperatura de 10 °C, após seis meses de armazenamento, a enzima SOD apresentou menor atividade na condição com 3,0 kPa O<sub>2</sub>, comparado às condições Ambiente e com 1,0 kPa O<sub>2</sub>,

sendo que, após dois e quatro meses não ocorreu diferença entre as condições de armazenamento (Figura 7a) Resultados similares foram encontrados na temperatura de 25 °C, sendo que aos quatro e seis meses, a condição com 3,0 kPa O<sub>2</sub> apresentou menor atividade em relação às condições Ambiente e com 1,0 kPa O<sub>2</sub>. Além disso, entre as temperaturas testadas, sementes armazenadas com 3,0 kPa O<sub>2</sub> associada à temperatura de 25 °C durante dois, quatro e seis meses, apresentaram menor atividade da SOD comparado à temperatura de 10 °C, sendo que nas condições Ambiente e com 1,0 kPa O<sub>2</sub> as temperaturas não apresentam efeito na atividade da SOD (Figura 7a).

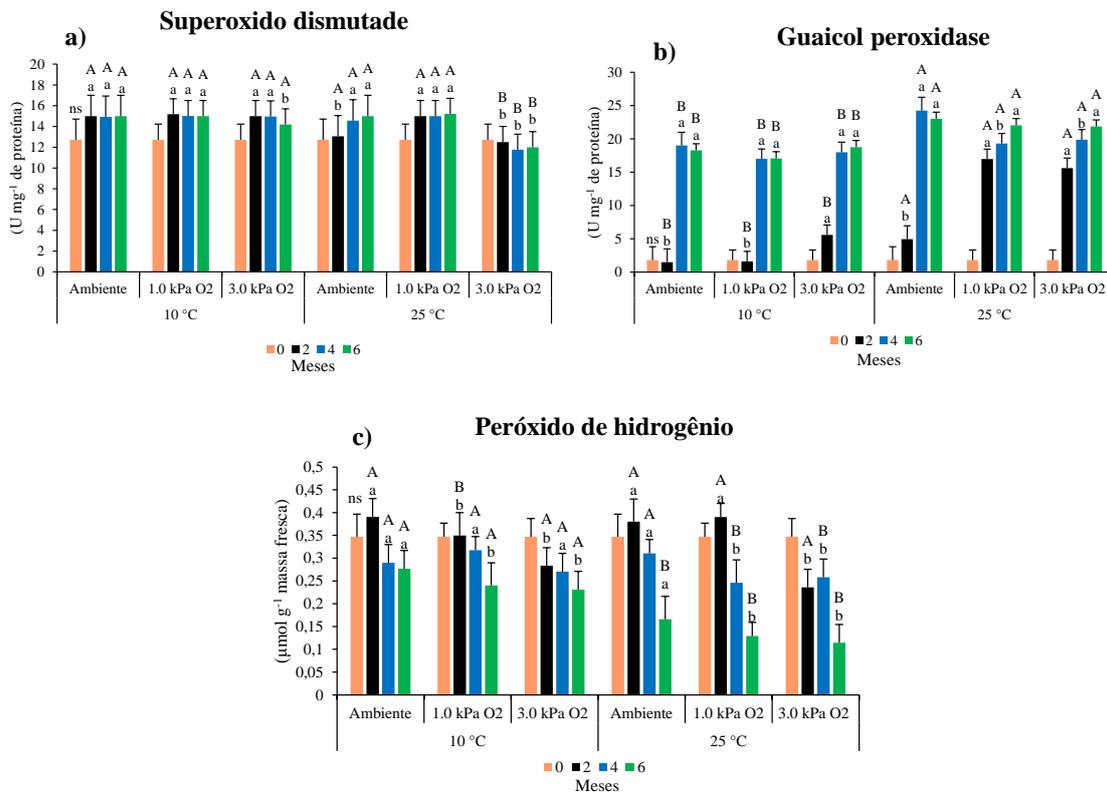


Figura 7- Atividade das enzimas superóxido dismutase-SOD (a) e guaiacol peroxidase-POD (b) e o conteúdo de peróxido de hidrogênio-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (c) de sementes de feijão cv. Fepagro Triunfo armazenadas em AC durante dois, quatro e seis meses nas temperaturas de 10 e 25 °C. Barras com a mesma letra minúsculas e maiúscula não diferem respectivamente entre as condições na mesma temperatura e nas mesmas condições entre temperaturas diferentes pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade de erro. Santa Maria, 2022.

Para a variável POD, na temperatura de 10 °C, aos dois meses de armazenamento, a condição de 3,0 kPa O<sub>2</sub> apresentou maior atividade em relação às condições Ambiente e com 1,0 kPa O<sub>2</sub>. Nesse mesmo período, na temperatura de 25 °C, as condições com 1,0 kPa O<sub>2</sub> e 3,0 kPa O<sub>2</sub> apresentaram maior atividade em relação à condição Ambiente. Aos quatro e seis meses não houve diferenças entre as variáveis testadas dentro da temperatura de 10 e 25 °C.

Ao comparar as condições de armazenamento nas temperaturas de 10 °C e 25 °C, observou-se que na temperatura de 25 °C todas as condições apresentaram maior atividade da POD, quando comparada a 10 °C (Figura 7b). Como uma das enzimas responsáveis pela degradação do H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> é a POD, podemos associar os resultados encontrados nas condições de AC, aos quatro e seis meses na temperatura de 25 °C, ao menor índice de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, comparado à temperatura de 10 °C (Figura 7c). Entretanto, no segundo ano, apesar das variáveis POD e H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> apresentarem menor e maior valor, respectivamente, nas condições a 10 °C em relação à temperatura de 25 °C, não houve esse mesmo efeito para a atividade da SOD. Segundo Castro et al. (2017) e Oliveira et al. (2020), esta enzima está associada também à melhor qualidade de sementes, embora não havendo efeito negativo nas outras variáveis analisadas durante o armazenamento na temperatura de 10 °C.

### 3.5.7 Emergência a campo

Para uma melhor avaliação das respostas das sementes submetidas às condições de armazenamento, foram determinadas algumas variáveis a campo, entre elas a emergência a campo. Foram verificadas diferenças entre as temperaturas de armazenamento para a cultivar F. Triunfo, onde sementes armazenadas nas condições Ambiente e com 1,0 kPa O<sub>2</sub>, na temperatura de 10, 15 e 20°C, apresentaram maior emergência quando comparado à temperatura de 25 °C, sendo que, na condição com 1,0 kPa O<sub>2</sub> + 15,0 kPa CO<sub>2</sub> não houve diferença entre as temperaturas avaliadas (Figura 8a). Na cultivar F. Garapiá não houve diferenças entre as condições e entre as temperaturas de armazenamento (Figura 8b). No segundo ano de experimento não houve diferenças significativas para a variável emergência de plantas nas condições de atmosfera avaliadas para a cultivar F. Triunfo (Figura 8c).

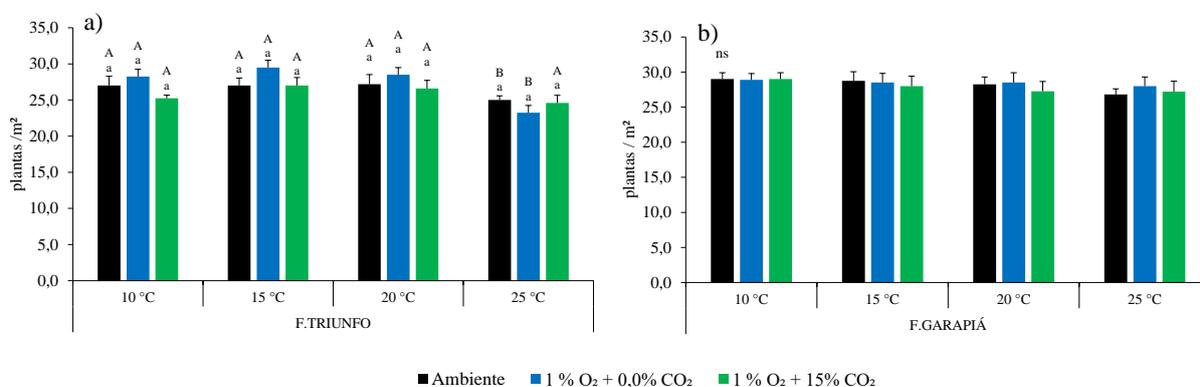


Figura 8- Emergência a campo das sementes de feijão das cultivares F. Triunfo (a) e F. Garapiá (b), armazenadas em AC durante seis meses nas temperaturas de 10, 15, 20 e 25 °C. Barras com a mesma letra minúscula e maiúscula não diferem respectivamente entre as condições na mesma temperatura e nas mesmas condições entre temperaturas diferentes pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade de erro.

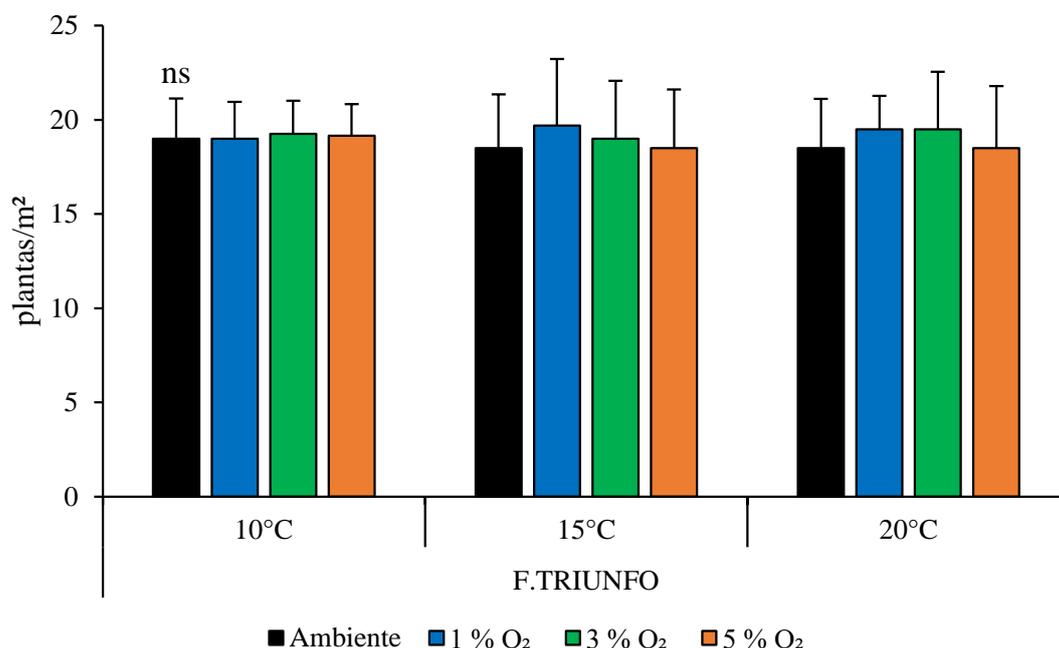


Figura 8c- Emergência a campo de sementes de feijão cv. Fepagro Triunfo armazenadas em AC durante seis meses nas temperaturas de 10, 15 e 20 °C. Barras com a mesma letra minúsculas e maiúscula não diferem respectivamente entre as condições na mesma temperatura e nas mesmas condições entre temperaturas diferentes pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade de erro.

A emergência a campo é uma variável que expressa a qualidade de sementes, principalmente em condições adversas de temperatura, umidade, ataque de fungos e insetos (SILVA et al., 2018). O resultado apresentado neste estudo, principalmente no primeiro ano de condução, demonstra que a temperatura de armazenamento é um fator importante para garantir a qualidade fisiológica da semente. Outros trabalhos encontrados na literatura vão ao encontro dos resultados deste estudo, salientando que o armazenamento hermético tem demonstrado melhor manutenção da qualidade fisiológica de sementes (MARCOS FILHO et al., 2015). Além disso, Ludwig (2020) observou que baixas pressões parciais de O<sub>2</sub> no armazenamento de soja não foram eficientes para manter níveis aceitáveis de emergência a campo de três cultivares na temperatura de 20 °C.

### 3.5.8 Altura de plantas

A altura de plantas foi mensurada em três estágios de desenvolvimento do feijoeiro para as duas cultivares avaliadas. Não houve diferenças entre as condições de armazenamento e temperaturas na altura de plantas nos estágios fenológico V2 e V7 para as cultivares F.

Triunfo e F. Garapiá, no primeiro ano (Figura 9a e 9b) e para cultivar F. Triunfo, no segundo ano (Figura 9c).

Nas cultivares F. Triunfo e F. Garapiá, no estágio R6, foi observada diferença significativa na temperatura de 10°C, onde as sementes armazenadas com 1,0 kPa O<sub>2</sub> e 1,0 kPa O<sub>2</sub> + 15,0 kPa CO<sub>2</sub> resultaram plantas de maior altura em comparação à condição Ambiente (Figura 9a e 9b). Nas temperaturas de 15, 20 e 25 °C não houve diferenças entre as condições de atmosfera avaliadas (Figura 9a). Sementes armazenadas em 1,0 kPa O<sub>2</sub> nas temperaturas de 20 e 25 °C resultaram em plantas de menor altura em relação às temperaturas de 10 e 15 °C e as sementes armazenadas em 1,0 kPa O<sub>2</sub> + 15,0 kPa CO<sub>2</sub> apresentaram maior altura de planta na temperatura de 10 °C, comparado às temperaturas de 15, 20 e 25 °C (Figura 9a).

Na cultivar F. Garapiá, no estágio R6, foi observada diferença significativa na temperatura de 25 °C, onde as condições Ambiente e com 1,0 kPa O<sub>2</sub> apresentaram maior altura de planta em comparação à condição 1,0 kPa O<sub>2</sub> + 15,0 kPa CO<sub>2</sub>, sendo que nas temperaturas de 15 e 20 °C, as condições de armazenamento não afetaram a altura de planta (Figura 9b).

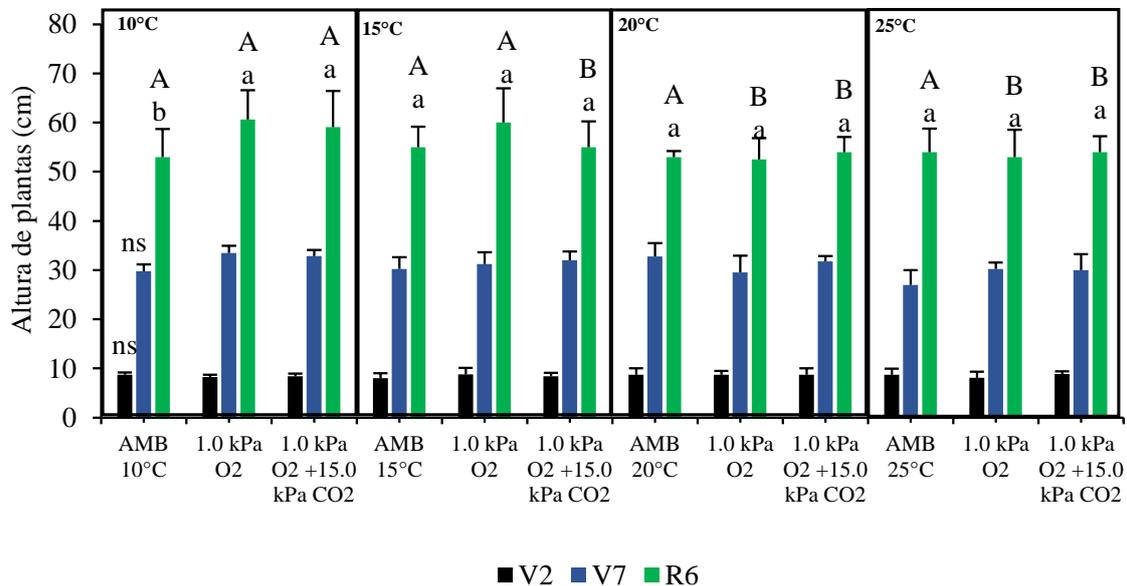


Figura 9a- Altura de plantas de feijão da cv. Fepagro Triunfo em três estágios fenológicos provenientes de sementes armazenadas em AC durante seis meses nas temperaturas de 10, 15, 20 e 25 °C. Barras com a mesma letra minúsculas e maiúscula não diferem respectivamente entre as condições na mesma temperatura e nas mesmas condições entre temperaturas diferentes pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade de erro.

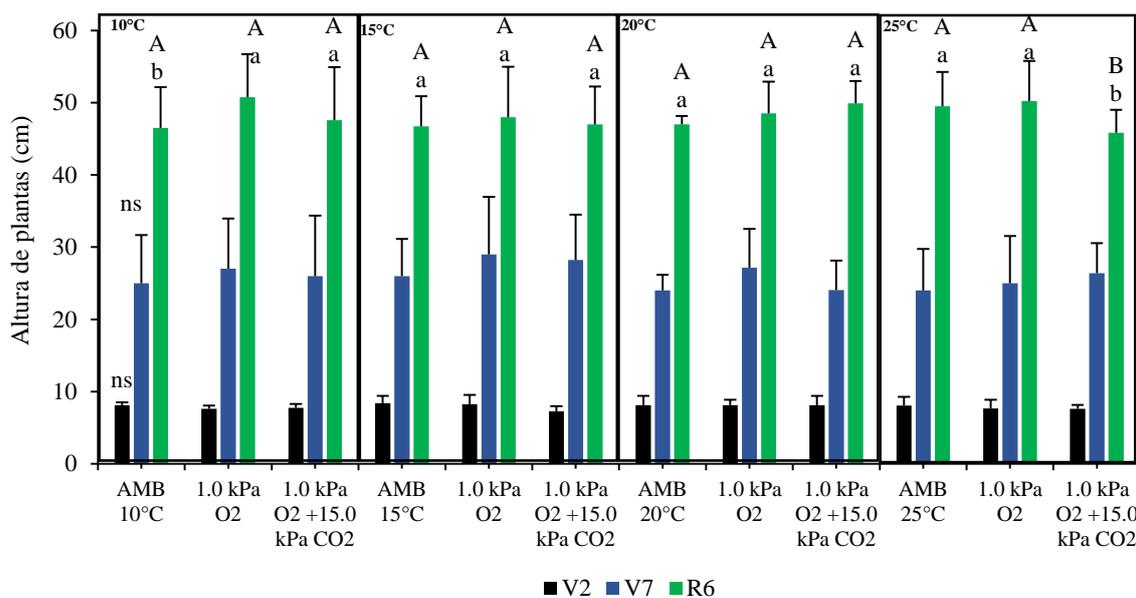


Figura 9b- Altura de plantas de feijão da cv. Fepagro Garapiá em três estágios fenológicos provenientes de sementes armazenadas em AC durante seis meses nas temperaturas de 10, 15, 20 e 25 °C. Barras com a mesma letra minúsculas e maiúscula não diferem respectivamente entre as condições na mesma temperatura e nas mesmas condições entre temperaturas diferentes pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade de erro.

No segundo ano experimental novamente observou-se diferenças significativas quanto à altura de plantas apenas no estágio fenológico R6 (Figura 9c). Sementes armazenadas com 1,0 kPa O<sub>2</sub>, 3,0 kPa O<sub>2</sub> e 5,0 kPa O<sub>2</sub> nas temperaturas de 10 e 15 °C resultaram em plantas com maior altura em relação à condição Ambiente de armazenamento. Na temperatura de 20 °C, as plantas armazenadas nas condições com 1,0 kPa O<sub>2</sub> e 3,0 kPa apresentaram maior altura de plantas em relação às condições Ambiente e com 5,0 kPa O<sub>2</sub>. Com relação às temperaturas avaliadas, todas as condições de AC mantidas sob 10 e 15 °C apresentaram plantas com maior altura em relação à temperatura de 20 °C (Figura 9c).

O vigor de sementes está relacionado diretamente com o crescimento de plantas e este associado às avaliações de altura de plantas no campo. Condições de armazenamento de sementes afetam a altura de plantas, tanto na parte radicular como na aérea, fornecendo maior aporte de nutriente devido a absorção radicular e, conseqüentemente, aumentando o crescimento vegetativo significativamente (ALVES, 2017; BAGATELI et al., 2019). Sementes com elevado vigor trazem aspectos positivos além de maior altura de plantas, como o incremento na produtividade final das culturas (TEKRONY; EGLI, 1991; AMARO et al., 2015).

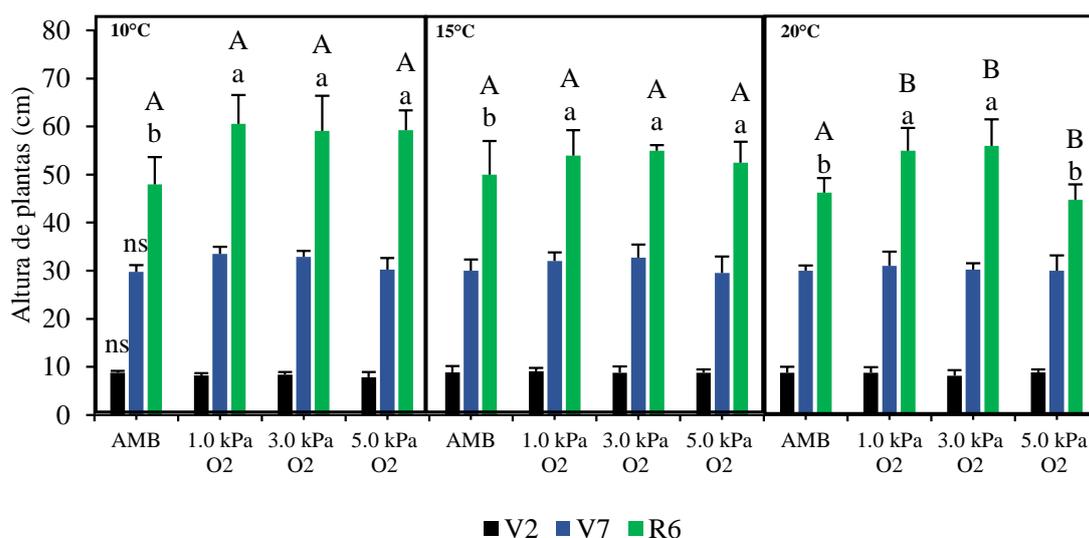


Figura 9c-Altura de plantas de feijão da cv. Fepagro Triunfo em três estágios fenológicos provenientes de sementes armazenadas em AC durante seis meses nas temperaturas de 10, 15 e 20 °C. Barras com a mesma letra minúscula e maiúscula não diferem respectivamente entre as condições na mesma temperatura e nas mesmas condições entre temperaturas diferentes pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade de erro.

### 3.5.9 Índice de área foliar

A determinação do índice de área foliar (IAF) é uma importante forma de avaliar a eficiência fotossintética das plantas (RICHTER et al., 2014; ZANON et al., 2015). Devido ao fato do IAF determinar a capacidade das plantas de interceptarem a radiação solar através da AF e converterem esta radiação em matéria seca pelo processo fotossintético, é de suma importância buscar informações sobre o efeito das condições de armazenamento das sementes sobre o IAF da cultura do feijoeiro.

O índice de área foliar (IAF), da mesma forma que a altura de plantas, foi mensurado em três estádios de desenvolvimento. Para as cultivares F. Triunfo e F. Garapiá não houve diferenças no IAF de plantas no estágio fenológico V2 (Figura 10a e 10b). No estágio V7, foi observada diferença significativa na temperatura de 10°C, onde sementes armazenadas com 1,0 kPa O<sub>2</sub> apresentaram maior IAF em relação às condições Ambiente e com 1 kPa O<sub>2</sub> + 15,0 kPa CO<sub>2</sub>. Ainda nesse estágio, não houve diferença nas temperaturas de 15 e 20 °C, sendo que na temperatura de 25 °C a condição Ambiente apresentou o maior IAF em comparação às condições com 1,0 kPa O<sub>2</sub> e 1,0 kPa O<sub>2</sub> + 15,0 kPa CO<sub>2</sub> (Figura 10a).

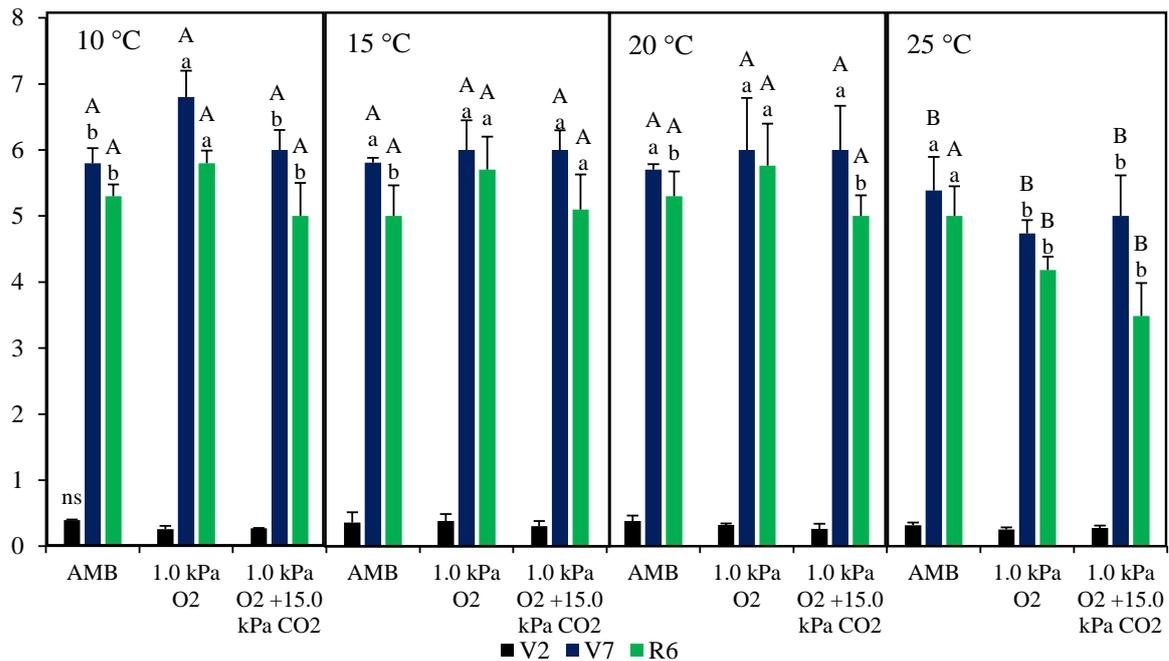


Figura 10a- Índice de área foliar de feijoeiro da cv. Fepagro Triunfo em três estágios fenológicos proveniente de sementes armazenadas em AC durante seis meses nas temperaturas de 10, 15, 20 e 25 °C. Barras com a mesma letra minúsculas e maiúscula não diferem respectivamente entre as condições na mesma temperatura e nas mesmas condições entre temperaturas diferentes pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade de erro.

No estágio reprodutivo R6 na temperatura de 10 e 20°C, a condição com 1,0 kPa O<sub>2</sub> apresentou maior IAF em relação às condições Ambiente e com 1 kPa O<sub>2</sub> + 15,0 kPa CO<sub>2</sub>. Na temperatura de 15 °C, as condições com 1,0 kPa O<sub>2</sub> e 1,0 kPa O<sub>2</sub> + 15,0 kPa CO<sub>2</sub> apresentaram maior IAF em relação à condição Ambiente. No armazenamento sob 25 °C, a condição Ambiente apresentou maior IAF comparado às condições de AC. Todas as condições a 25 °C em V7, exceto a condição Ambiente em R6, apresentaram menor IAF comparado às outras temperaturas avaliadas (Figura 10a).

Na cultivar F. Garapiá não foram observadas diferenças entre as três condições de atmosfera em cada temperatura, nos estágios V7 e R6. Entretanto, houve diferença entre as temperaturas de armazenamento, onde as condições Ambiente e com 1,0 kPa O<sub>2</sub> nas temperaturas de 20 e 25 °C, apresentaram menor IAF nos estágios V7 e R6, comparado às temperaturas de 10 e 15 °C, sendo que a condição com 1,0 kPa O<sub>2</sub> + 15,0 kPa CO<sub>2</sub> apresentou maior IAF nas temperaturas de 10 e 15 °C no estágio V7 e na temperatura de 10 °C para o estágio R6, comparado às outras temperaturas avaliadas (Figura 10b).

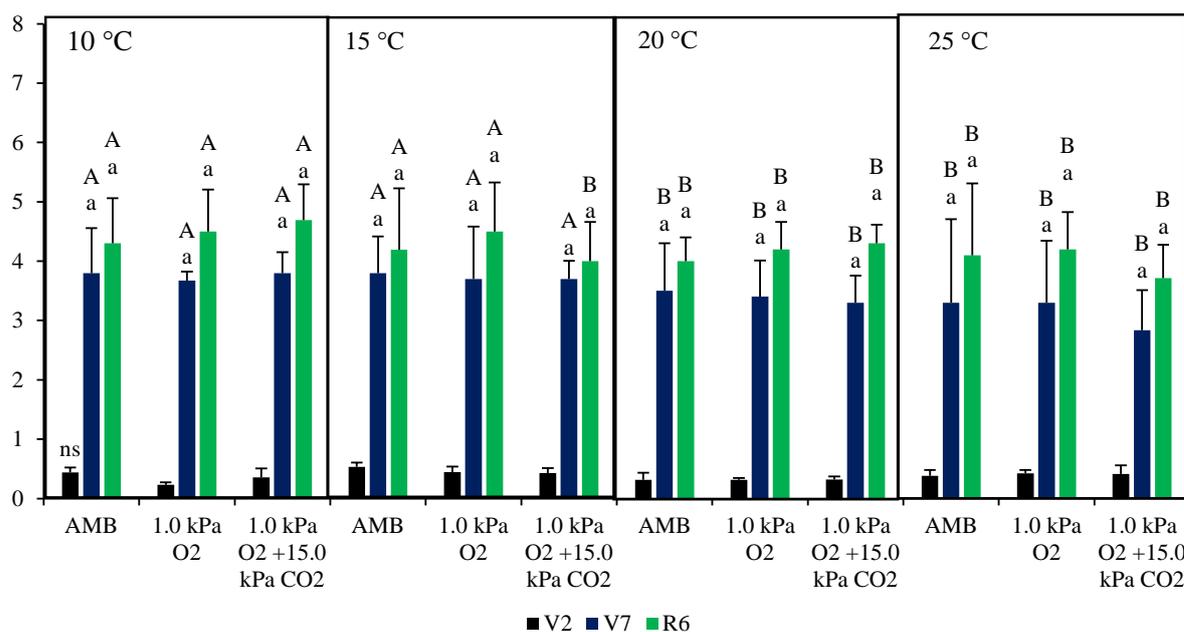


Figura 10b- Índice de área foliar de feijoeiro da cv. Fepagro Garapiá em três estágios fenológicos proveniente de sementes armazenadas em AC durante seis meses nas temperaturas de 10, 15, 20 e 25 °C. Barras com a mesma letra minúsculas e maiúscula não diferem respectivamente entre as condições na mesma temperatura e nas mesmas condições entre temperaturas diferentes pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade de erro.

Para o segundo ano experimental, o índice de área foliar (IAF), da mesma forma que no primeiro ano, foi mensurado em três estádios de desenvolvimento. Nos estágios V2 e V7 foi observada diferença significativa na temperatura de 10°C, onde sementes armazenadas com 1,0, 3,0 e 5,0 kPa O<sub>2</sub> apresentaram maior IAF em relação à condição Ambiente. Além disso, todas as sementes armazenadas nas condições de AC na temperatura de 10 °C resultaram maior IAF, comparado às temperaturas de 15 e 20 °C, sendo que na condição Ambiente, as temperaturas não afetaram o IAF (Figura 10c). No estágio R6 foi observada diferença significativa na temperatura de 10°C, onde sementes armazenadas em 1,0 kPa O<sub>2</sub> apresentaram maior IAF em relação às condições Ambiente, com 3,0 e 5,0 kPa O<sub>2</sub>. Nesse estágio não houve diferença nas temperaturas de 15 °C, sendo que na temperatura de 20 °C, as condições Ambiente, com 1,0 e 3,0 kPa O<sub>2</sub> apresentaram maior IAF em comparação à condição com 5,0 kPa O<sub>2</sub> (Figura 10c). Entre as temperaturas de armazenamento houve diferenças na condição com 1,0 kPa O<sub>2</sub> na temperatura de 10 °C, a qual apresentou maior IAF nos estágios V7 e R6 em relação às temperaturas de 15 e 20 °C. Além disso, sementes armazenadas na condição de 5,0 kPa O<sub>2</sub> apresentaram maior IAF nas temperaturas de 10 e 15 °C em comparação à temperatura de 20 °C (Figura 10c).

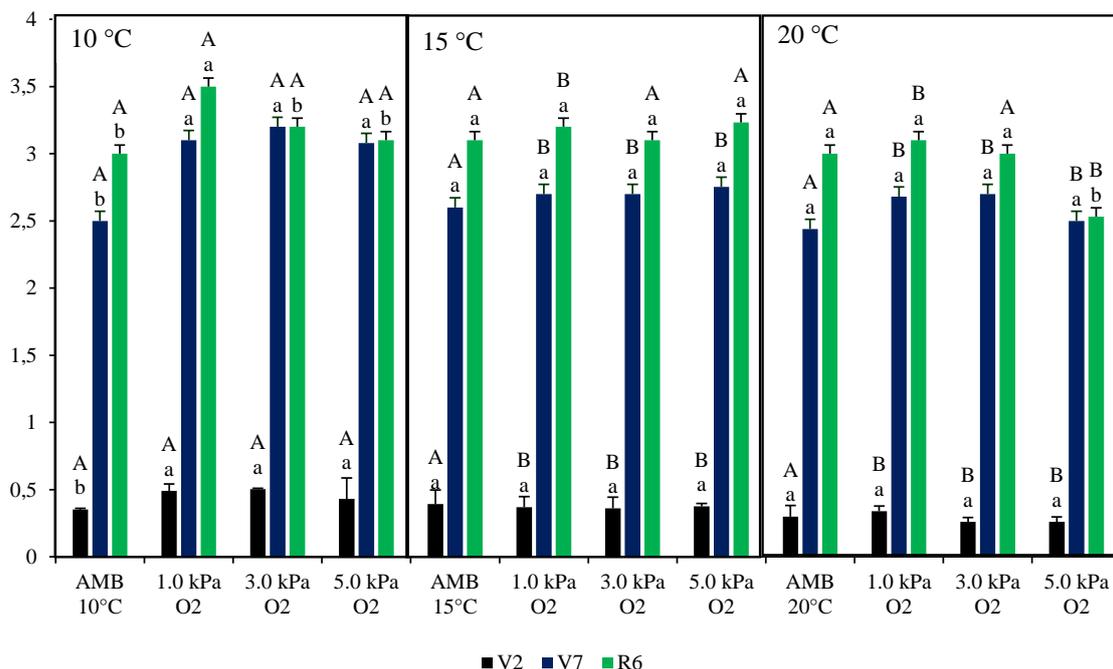


Figura 10c-Índice de área foliar de feijoeiro da cv. Fepagro Triunfo em três estágios fenológicos proveniente de sementes armazenadas em AC durante seis meses nas temperaturas de 10, 15 e 20 °C. Barras com a mesma letra minúsculas e maiúscula não diferem respectivamente entre as condições na mesma temperatura e nas mesmas condições entre temperaturas diferentes pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade de erro.

Os resultados do primeiro e segundo ano de experimento demonstram que as condições de armazenamento, principalmente as baixas concentrações de O<sub>2</sub> associadas às baixas temperaturas promovem maior crescimento vegetativo, área foliar e, conseqüentemente, maior IAF na cultura do feijão, aumentando a capacidade fotossintética e, conseqüentemente, nutrindo melhor os grãos/sementes com fotoassimilados, aumentando sua massa. Trabalho de Tavares et al. (2013) corrobora com os presentes resultados, em que o crescimento vegetativo do feijoeiro e seu IAF demonstram efeito no ganho de produtividade, quando são comparadas com plantas com menor IAF advindas de diferentes lotes de vigor.

### 3.6 Produtividade

Para a variável produtividade, na avaliação final do ciclo de desenvolvimento das cultivares de feijão foi observado que para a cultivar F. Triunfo houve diferenças significativas na produtividade entre as condições de atmosfera em cada temperatura avaliada (Figura 11a). Sementes armazenadas nas temperaturas de 10 e 15 °C, associada à condição

Ambiente, apresentaram menor produtividade em comparação às condições de AC com 1,0 kPa O<sub>2</sub> e 1,0 kPa O<sub>2</sub> + 15,0 kPa CO<sub>2</sub>. Para as temperaturas de 20 e 25 °C não houve diferenças entre as três condições de atmosfera avaliadas. Na temperatura de 25 °C, as condições de AC com 1,0 kPa O<sub>2</sub> e 1,0 kPa O<sub>2</sub> + 15,0 kPa CO<sub>2</sub> apresentaram menor produtividade em relação às temperaturas de 10, 15 e 20 °C (Figura 11a).

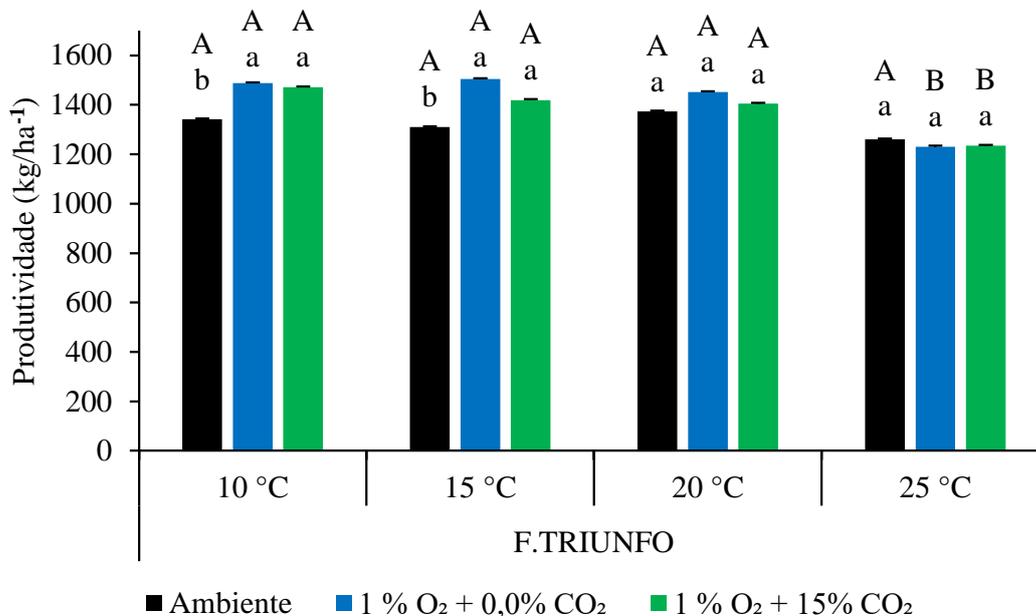


Figura 11a-Produtividade de feijoeiro da cv. Fepagro Triunfo proveniente de sementes armazenadas em AC durante seis meses nas temperaturas de 10, 15, 20 e 25 °C. Barras com a mesma letra minúsculas e maiúscula não diferem respectivamente entre as condições na mesma temperatura e nas mesmas condições entre temperaturas diferentes pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade de erro.

Na cultivar F. Garapiá, houve diferenças de produtividade entre as condições de atmosfera na temperatura de 10 °C, onde sementes armazenadas na condição Ambiente, apresentaram menor produtividade em comparação às condições de AC com 1,0 kPa O<sub>2</sub> e 1,0 kPa O<sub>2</sub> + 15,0 kPa CO<sub>2</sub>. As temperaturas de 15, 20 e 25 °C não apresentaram diferenças entre as três condições avaliadas de AC, porém reduziram a produtividade quando comparadas à temperatura de 10 °C (Figura 11b).

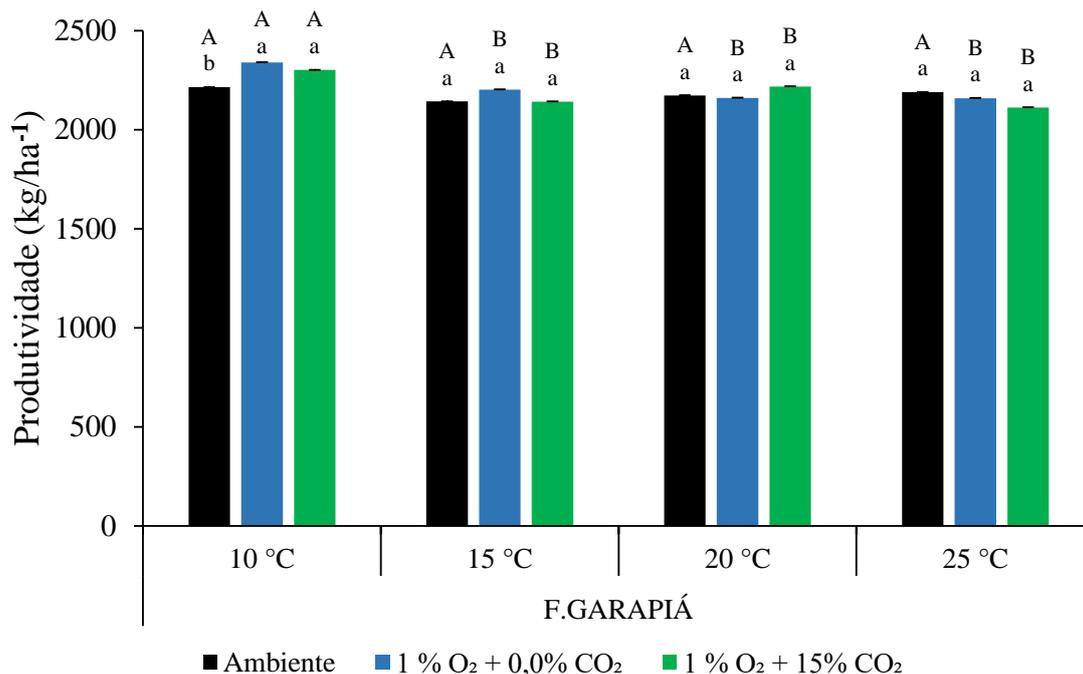


Figura 11b- Produtividade de feijoeiro da cv. Fepagro Garapiá proveniente de sementes armazenadas em AC durante seis meses nas temperaturas de 10, 15, 20 e 25 °C. Barras com a mesma letra minúsculas e maiúscula não diferem respectivamente entre as condições na mesma temperatura e nas mesmas condições entre temperaturas diferentes pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade de erro.

A cultivar F. Triunfo, na temperatura de 10 °C, apresentou uma produtividade de 1.487,8 e 1.471,6 kg ha<sup>-1</sup> nas condições com 1,0 kPa O<sub>2</sub> e 1,0 kPa O<sub>2</sub> + 15,0 kPa CO<sub>2</sub>, respectivamente, com um aumento de 146,6 e 130,5 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente, quando comparado à condição Ambiente, que apresentou uma produtividade de 1.341 kg ha<sup>-1</sup>. Em 15 °C, as condições de 1,0 kPa O<sub>2</sub> e 1,0 kPa O<sub>2</sub> + 15,0 kPa CO<sub>2</sub> apresentaram um aumento de 194,2 e 109,2 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente em relação à condição Ambiente, a qual apresentou uma produtividade de 1.309 kg ha<sup>-1</sup>. As condições de AC, na temperatura de 10 °C, apresentaram uma produtividade superior às condições de AC a 25 °C. As diferenças de produtividade das condições com 1,0 kPa O<sub>2</sub> e 1,0 kPa O<sub>2</sub> + 15,0 kPa CO<sub>2</sub> foram de 256,6 e 236,7 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente (Figura 11a).

Na cultivar F. Garapiá, na temperatura de 10 °C, foi observada uma produtividade de 2.340,8 e 2.302,2 kg ha<sup>-1</sup> nas condições com 1,0 kPa O<sub>2</sub> e 1,0 kPa O<sub>2</sub> + 15,0 kPa CO<sub>2</sub>, um aumento de 125,7 e 87,2 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente, comparado à condição Ambiente, que apresentou uma produtividade de 2.215,06 kg ha<sup>-1</sup> (Figura 11b). As condições de AC na temperatura de 10 °C apresentaram uma produtividade superior às condições de AC com 15, 20 e 25 °C. As diferenças de produtividade das condições com 1,0 kPa O<sub>2</sub> e 1,0 kPa O<sub>2</sub> + 15,0

kPa CO<sub>2</sub> para cada temperatura foram respectivamente, 137,1 e 160,17 kg ha<sup>-1</sup> (15°C); 179,9 e 83,9 kg ha<sup>-1</sup> (20°C) e 180,7 e 189,7 kg ha<sup>-1</sup> (25°C).

A produtividade no segundo ano experimental para a cultivar F. Triunfo apresentou diferenças significativas entre as condições de atmosfera avaliadas durante o armazenamento. Sementes armazenadas com 1,0, 3,0 e 5,0 kPa O<sub>2</sub> na temperatura de 15 °C apresentaram maior produtividade em comparação à condição Ambiente. Na temperatura de 20 °C, as condições de AC com 1,0 e 3,0 kPa O<sub>2</sub> apresentaram maior produtividade em relação às condições Ambiente e com 5,0 kPa O<sub>2</sub>. Na temperatura de 10 °C não houve diferenças entre as condições de atmosfera avaliada (Figura 11c). Entre as temperaturas de armazenamento, observou-se diferenças significativas de produtividade, onde todas as condições de armazenamento nas temperaturas de 10 e 15 °C apresentaram maior produtividade comparado à temperatura de 20 °C (Figura 11c).

O presente estudo demonstrou que lavouras de feijão provenientes de sementes armazenadas em condições de AC apresentaram maior produtividade quando associado a baixas temperaturas, 10 e 15 °C, quando comparado com temperaturas maiores, demonstrando que a temperatura de armazenamento é um fator crucial para garantir a qualidade fisiológica da semente durante o armazenamento para que possa expressar respostas positivas no campo, que culminam com o ganho de produtividade. Esse trabalho demonstra na prática o que trabalhos científicos relatam sobre menor produtividade da cultura do feijoeiro relacionada à baixa qualidade de sementes, devido a temperaturas inadequadas empregadas. Além disso, podemos destacar que a produtividade do feijoeiro é resultado da qualidade da semente, que vai expressar comportamento distinto durante o crescimento e desenvolvimento da cultura, conforme já relatado por diversos autores (VIEIRA; YOKOYAMA, 2000; BERTOLIN et al., 2011; SILVA et al., 2018; BAGATELI et al., 2019; LUDWIG et al., 2021a; ABUD et al., 2022).

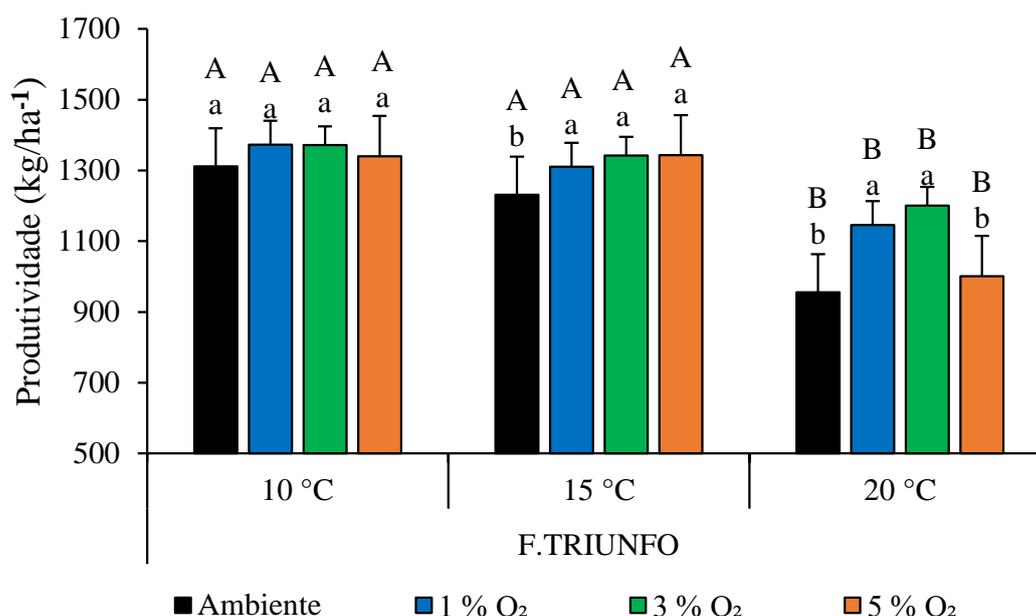


Figura 11c- Produtividade de feijoeiro da cv. Fepagro Triunfo proveniente de sementes armazenadas em AC durante seis meses nas temperaturas de 10, 15 e 20 °C. Barras com a mesma letra minúsculas e maiúscula não diferem respectivamente entre as condições na mesma temperatura e nas mesmas condições entre temperaturas diferentes pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade de erro.

#### 4 CONCLUSÕES

O armazenamento hermético associado com AC possibilita manter uma alta qualidade de sementes de feijão após seis e oito meses de armazenamento nas cultivares F. Triunfo e F. Garapiá.

A utilização de 1,0 kPa O<sub>2</sub> e 1,0 kPa O<sub>2</sub> + 15,0 kPa CO<sub>2</sub> associado à temperatura de 10, 15 e 20 °C proporciona maior manutenção da qualidade fisiológica de sementes da cultivar F. Triunfo, possibilitando acréscimo de produtividade nas temperaturas de 10 e 15 °C, em comparação à condição Ambiente. No entanto, o aumento da concentração de CO<sub>2</sub> durante o armazenamento não apresentou efeito aditivo quando utilizado de forma conjunta ao baixo oxigênio nas duas cultivares e nas temperaturas de 10, 15, 20 e 25 °C.

A utilização de 1,0 kPa O<sub>2</sub> associado à temperatura de 10 °C proporciona maior manutenção da qualidade fisiológica de sementes de feijão para a cultivar F. Garapiá possibilitando o maior acréscimo de produtividade em comparação à condição Ambiente.

## 5 REFERÊNCIAS

AGUIAR, RW de S. et al. Effect of carbon dioxide on quality of rice seeds. **Bioscience Journal**, v. 31, n. 5, p. 1413-1422, 2015.

ALENCAR, E. R., et al. Qualidade dos grãos de soja armazenados em diferentes condições. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, n. 5, p. 606-613, 2009. <https://doi.org/10.1590/s1415-43662009000500014>.

ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.D. de; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

ALVES, C. X. Recobrimento de sementes de feijão com agrominerais: efeito sobre o armazenamento de sementes e desempenho de plantas. 2017.

AMARO, Hugo T. R et al. Testes de vigor para avaliação da qualidade fisiológica de sementes de feijoeiro. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 38, n. 3, p. 383-389, 2015.

ANJUM, Naser A. et al. Lipids and proteins—major targets of oxidative modifications in abiotic stressed plants. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 22, p. 4099-4121, 2015.

APEL, K., HIRT, H., 2004. Reactive oxygen species: metabolism, oxidative stress, and signal transduction. **Annual Review of Plant Biology**. 55, 373–399.

BAGATELI, J. R. et al. Productive performance of soybean plants originated from seed lots with increasing vigor levels. **Journal of Seed Science**, v. 41, p. 151-159, 2019.

BAILLY, C., 2004. Active oxygen species and antioxidants in seed biology. *Seed Sci. Res.* 14, 93–107.

BAKHTAVAR, M.A.; AFZAL I. Climate smart Dry Chain technology for safe storage of quinoa seeds. **Scientific Reports**, v. 10, 2020.

BAKHTAVAR, M.A.; AFZAL I. Climate smart Dry Chain technology for safe storage of quinoa seeds. **Scientific Reports**, v. 10, 2020.

BARBOSA, L.C. DE S.; ZUCHI, J.; SOUZA, M.S.; SOUZA, M.M.V., ASSIS, N.P.C.; NASCIMENTO, K.J.T.; MACHADO, M.; KUSTER, V.C.; SALES, J.F.; ROCHA, D.I. Antioxidant enzyme activity and dynamics of reserve mobilization during germination and early seedling establishment of royal poinciana [*Delonix regia* (Bojer ex Hook.) Raf.]. *Trees* (2023) 37:385–402.

BARTOSIK, R.; CARDOSO, L.; RODRÍGUEZ, J. Early detection of spoiled grain stored in hermetic plastic bags (silo-bags) using CO<sub>2</sub> monitoring. In: *Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Conference on Controlled Atmosphere and Fumigation in Stored Products*. 2008, p. 550-554.

BEAUCHAMP, C.; FRIDOVICH, I. Superoxide dismutase: improved assays and an assay applicable to acrylamide gels. **Anal Biochemistry**, v.8, n.44, p.276–287, 1971. Available in: <<http://www.researchgate.net/publication/18224457>>. Accessed in: Jul. 2014. doi: 10.1016/0003-2697(71)90370-8.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para análise de sementes**, p. 309, 315, 316, 2009.

BUIJS, G., WILLEMS, L. A., KODDE, J., GROOT, S. P., & BENTSINK, L. Evaluating the EPPO method for seed longevity analyses in Arabidopsis. **Plant Science**, v. 301, p. 110644, 2020.

CARVALHO, Everson Reis et al. Alterações isoenzimáticas em sementes de cultivares de soja em diferentes condições de armazenamento. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 49, p. 967-976, 2014.

CARVALHO, Maria Otília et al. The use of modified atmospheres to control *Sitophilus zeamais* and *Sitophilus oryzae* on stored rice in Portugal. **Journal of stored products research**, v. 50, p. 49-56, 2012.

CASTRO, Douglas Goulart et al. Qualidade fisiológica e expressão enzimática de sementes de soja RR<sup>®</sup>. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 40, n. 1, p. 222-235, 2017.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB) Acompanhamento da safra brasileira de grãos. Sexto levantamento. v.5, n.6, março 2022. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>. Acesso em 05 de janeiro de 2022.

COSTA, A. R. et al. Qualidade de grãos de milho armazenados em silos bolsa. **Revista Ciência Agronômica**, v. 41, n. 2, p. 200-207, 2010.

DELOUCHE, J. C.; BASKIN, C. C. Accelerated aging techniques for predicting the relative storability of seeds lots. **Seed science and technology**, v. 1, n.2, p. 427-452, 1973.

ELIAS, M. C. Fatores que influenciam a aeração e o manejo da conservação de grãos. In: Lorini, I. et al. (Ed.). Armazenagem de grãos, Cap. 6.1, p. 311-359, 2002.

Elsadr, H. T. et al. Characterization of seed coat postharvest darkening in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). **Theoretical and Applied Genetics**, v.123, p.1467-1472, 2011.

FREITAS R, S. et al. Hermetic storage for control of common bean weevil. *Acanthoscelides obtectus* (Say). **Journal of Stored Products Research**, v. 66, p.1-5, 2016.

GIANNOPOLITIS, C.N.; RIES, S.K. Purification and quantitative relationship with water-soluble protein in seedlings. **Journal of Plant Physiology**, v.48, n.59, p.315-318, 1977.

GROOT, S. P. C. et al. Prolonging the longevity of ex situ conserved seeds by storage under anoxia. **Plant Genetic Resources**, v. 13, n. 01, p. 18-26, 2015.

HÖFS, A. et al. Emergência e crescimento de plântulas de arroz em resposta à qualidade fisiológica de sementes. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 26, n. 1, p. 92-97, 2004.

IBRO, G. et al. Adoption of cowpea hermetic storage by women in Nigeria, Niger and Burkina Faso. **Journal of Stored Products Research**, v. 58, p. 87-96, 2014.

JONES, M. et al. Profitability of hermetic purdue improved crop storage (pics) bags for african common bean producers. **Department of agricultural economics Purdue university**, 2011 b.

KONG, F.; CHANG, S. K. C. Changes in protein characteristics during soybean storage under adverse conditions as related to tofu making. **Journal of Food Agriculture and Food Chemistry**. v. 61, p. 387-393, 2013.

KUMAR, D., & KALITA, P. (2017). Reducing postharvest losses during storage of grain crops to strengthen food security in developing countries. **Foods**, v.6, n.1 p. 8.

LANE, B.; WOLOSHUK, C. Impact of storage environment on the efficacy of hermetic storage bags. **Journal Stored Products Research**, v. 72, p. 83-89, 2017.

LANE, B.; WOLOSHUK, C. Impact of storage environment on the efficacy of hermetic storage bags. **Journal Stored Products Research**, v. 72, p. 83-89, 2017.

LORETO, F.; VELIKOVA, V. Isoprene produced by leaves protects the photosynthetic apparatus against ozone damage, quenches ozone products, and reduces lipid peroxidation of cellular membranes. **Plant Physiology**, v.127, p.1781-1787, 2001.

LUDWIG, V. Atmosfera controlada e temperatura de armazenamento na qualidade fisiológica e química de sementes e grãos de soja. **Dissertação de Mestrado**. Universidade Federal de Santa Maria. 2020.

LUDWIG, V. et al. Impact of controlled atmosphere storage on physiological quality of soybean seed. **Journal of Stored Products Research** v. 90, 2021a.

LUDWIG, V. et al. The effects of soybean storage under controlled atmosphere at different temperatures on lipid oxidation and volatile compounds profile. **Food Research International**, p. 110483, 2021b.

MARCOS FILHO, J. Seed vigor testing: an overview of the past, present and future perspective. **Scientia Agricola**, v. 72, p. 363-374, 2015.

MARCOS FILHO, J. Seed vigor testing: an overview of the past, present and future perspective. **Scientia agricola**, v. 72, p. 363-374, 2015.

OCHANDIO, D. et al. Modelling respiration rate of soybean seeds (*Glycine max* (L.)) in hermetic storage. **Journal of Stored Products Research**, v. 74, p. 36-45, 2017.

OLIVEIRA, Thiago Lucas de et al. Biochemical changes and physiological quality of corn seeds subjected to different chemical treatments and storage times. **Journal of Seed Science**, v. 42, 2020.

OENEL, A. et al., 2017. Enzymatic and non–enzymatic mechanisms contribute to lipid oxidation during seed aging. **Plant Cell Physiol**. 58, 925–933.

PESKE, S.T.; VILLELA, F.A.; MENEGHELLO, G.E. **Sementes: fundamentos científicos e tecnológicos**. 3.ed., Pelotas: Editora e Gráfica da UFPel, 2012. 573p.

POSMYK MM, KURAN H, MARCINIAK K, JANAS KM (2008) Presowing seed treatment with melatonin protects red cabbage seedlings against toxic copper ion concentrations. **Journal of Pineal Research** v.45, p.24–31.

QUEZADA, M. Y. et al. Hermetic storage system preventing the proliferation of *Prostephanustruncatus* horn and storage fungi in maize with different moisture contents. **Postharvest Biology and Technology**, Amsterdam, v. 39, p. 321-326, 2006.

RATAJCZAK, E., MAŁECKA, A., BAGNIEWSKA-ZADWORNA, A., KALEMBA, E.M., 2015. The production, localization and spreading of reactive oxygen species contributes to the low vitality of long-term stored common beech (*Fagus sylvatica* L.) seeds. **Journal Plant Physiology**. 174, 147–156.

SANTOS, C. M. R. et al. Modificações fisiológicas e bioquímicas em sementes de feijão no armazenamento. **Revista brasileira de sementes**, v. 27, n. 1, p. 104-114, 2005.

SCHONS, A. et al. Genotype responses, seed treatment and storage conditions on physiological potential of soybean seeds. **Revista de Ciências Agrárias** (Portugal), v. 41, n. 1, p. 109-121, 2018.

SCHUCH, L. O. B. et al. Emergência no campo e crescimento inicial de aveia preta em resposta ao vigor das sementes. **Current Agricultural Science and Technology**, v. 6, n. 2, p. 97-101, 2000.

SILVA, M.G. et al. Hermetic storage as an alternative for controlling *Callosobruchus maculatus* (Coleoptera: Chrysomelidae) and preserving the quality of cowpeas. **Journal Stored Products Research**, v.78, p.27-31, 2018.

TAVARES, L.C.; RUFINO, C.A.; BRUNES, A.P.; TUNES, L.M.; BARROS, A.C.S.A.; PESKE, S.T. Desempenho de sementes de soja sob deficiência hídrica: rendimento e qualidade fisiológica da geração F1. **Ciência Rural**, v.43, n.8, p.1357-1363, 2013.

TOEBE, M. et al. Área foliar de feijão-vagem (*Phaseolus vulgaris* L.) em função de dimensões foliares. **Ciências Agrárias**, v.33, n.1, p.2491-2500, 2012.

WANG, Y. et al. Comparison of furans formation and volatile aldehydes profiles of four different vegetable oils during thermal oxidation. **Journal of food science**, v. 84, n. 7, p. 1966-1978, 2019.

WASZCZAK, C., CARMODY, M., KANGASJARVI, J., 2018. Reactive oxygen species in plant signaling. **Annual Review of Plant Biology**. v.69, p. 209–236.

WILLIAMS, S. B.; BARIBUTSA, D.; WOLOSHUK, C. Assessing Purdue Improved Crop Storage (PICS) bags to mitigate fungal growth and aflatoxin contamination. **Journal Stored Products Research**, v. 59, p. 190-196, 2014.

XIE, Xiulan et al. The roles of environmental factors in regulation of oxidative stress in plant. **BioMed research international**, v. 2019, 2019.

ZERAIK, A.E.; SOUZA, F.S.; FATIBELLO-FILHO, O. Desenvolvimento de um spot test para o monitoramento da atividade da peroxidase em um procedimento de purificação. **Química Nova**, v.31, p.731-734, 2008.

ZHU, Z; WEI, G.; LI, J.; QIAN, Q.; YU, J. Silicon alleviates salt stress and increases antioxidant enzymes activity in leaves of salt-stressed cucumber (*Cucumis sativus* L.). **Plant Science**, v.167, p.527-533, 2004.

ZIEGLER, Valmor; PARAGINSKI, Ricardo Tadeu; FERREIRA, Cristiano Dietrich. Grain storage systems and effects of moisture, temperature and time on grain quality-A review. **Journal of Stored Products Research**, v. 91, p. 101770, 2021.

## 6 DISCUSSÃO GERAL

Ano após ano, a produção mundial de grãos vem aumentando, e um dos motivos para esse crescente são as tecnologias utilizadas no meio agrícola, como a utilização de sementes de alta qualidade na hora da semeadura (BAGATELI et al., 2019; TONELLO et al., 2019). A qualidade de sementes é um fator fundamental e necessário para um bom estabelecimento de plantas de forma homogênea, bem como para que propiciem alto teto produtivo das culturas implantadas.

Neste último século, produtos e serviços estão ganhando destaque a partir de inovações em diversas áreas do ramo sementeiro. Com o crescente aumento do mercado de sementes, investimentos em análises de vigor que expressam sua qualidade, biotecnologias e tecnologias de armazenamento tem sido alvo de estudos afim de gerar valor e assegurar alta performance nas principais commodities cultivadas no Brasil.

Técnicas de armazenamento de sementes vem sendo foco de estudos em todo o mundo, a fim de garantir maior longevidade da qualidade de sementes, principalmente de culturas anuais. Existem atualmente métodos de armazenamento, como sistemas convencionais, sistemas refrigerados, semi-herméticos e herméticos, esse que, por sua vez, tem-se mostrado bastante eficaz em várias pesquisas realizadas (SILVA et al., 2018; LUDWIG et al., 2021a; ZIEGLER et al., 2021).

Adicionado ao armazenamento hermético, buscamos neste trabalho estudar a utilização da atmosfera controlada (AC) aplicando variações de pressões parciais de oxigênio, gás carbônico e variações de temperaturas durante seis a oito meses no armazenamento de sementes de feijão e soja, visando a manutenção da qualidade fisiológica de sementes e o impacto disso frente aos atributos produtivos após o armazenamento dessas culturas.

O presente estudo demonstrou de forma geral que, o armazenamento em baixas temperaturas, como de 10 e 15 °C, possibilitou tanto para a cultura de feijão quanto para a de soja maior qualidade de sementes, como manutenção da condutividade elétrica, comprimento total de plântulas, que são indicativos de vigor de sementes (WANG et al., 2019). Tal resultado indica menor quantidade de lixiviados durante a embebição do teste, favorecendo, consequentemente, a manutenção de reservas para a formação de maiores plântulas em maior germinação, conforme demonstrado no presente estudo.

Outro fator importante, são os sistemas de defesa que as sementes apresentam em detrimento às formas de armazenamento utilizadas. A atividade de enzimas reparadoras do processo de deterioração causada por radicais livres, direciona a resultados positivos quanto ao

uso da AC no armazenamento (MITTLER, 2017). Através do presente estudo, nota-se que enzimas como superóxido dismutase (SOD) e guaiacol peroxidase (POD), tiveram maior atividade em condições de AC em relação a condições Ambiente de armazenamento, onde o conteúdo de peróxido de hidrogênio também apresentou menor valor em relação às condições de AC, indicando assim maior qualidade fisiológica, maior ação de mecanismos de defesa para sementes armazenadas em AC, principalmente em temperaturas de 10 e 15 °C.

A boa qualidade de sementes demonstra ser um importantíssimo atributo para gerar e estabelecer no campo plantas uniformes, elevado crescimento e desenvolvimento, elevando assim os tetos produtivos (BAGATELLI et al., 2019). Nesse sentido, estudos apontam que o alto vigor das sementes pode proporcionar um aumento de 20 a 35% de produtividade para a cultura da soja, quando comparado com a utilização de sementes de baixo vigor. Além disso, trabalhos na literatura apontam que o armazenamento de sementes de feijão com temperaturas de 10 °C e com controle de umidade relativa (60%), garantem sementes com maior vigor em comparação à sementes armazenadas em temperaturas mais elevadas (20 °C), levando assim a uma maior manutenção do vigor das sementes, podendo, ainda, expressar em emergência um aumento de 12 %. (FRANÇA NETO., 2010; ZUCARELI et al., 2015).

Neste trabalho, após o armazenamento, variáveis a campo foram mensuradas, dentre elas, emergência a campo, altura de plantas, índice de área foliar e também a produtividade, destacando que, sementes armazenadas em baixo oxigênio (1 kPa O<sub>2</sub>) em temperaturas de 10 °C, para feijão e soja, indicam melhor performance após a semeadura, bem como superior índice de área foliar ao longo do período vegetativo e reprodutivo das plantas, maiores alturas de plantas e maior produtividade, apresentando também, para estas variáveis citadas, maiores valores em 10 °C, quando comparadas à temperaturas mais elevadas, como 20 e 25 °C. Esses resultados indicam que além do baixo oxigênio proporcionar melhor crescimento e desenvolvimento do estande de plantas, a baixa temperatura tem grande influência na manutenção da qualidade fisiológica de sementes, diferenças essas que iniciaram desde o armazenamento até o final do ciclo produtivo da cultura, destacado como produtividade final das culturas estudadas.

Além dos resultados encontrados durante o armazenamento de feijão e soja sob utilização de técnicas inovadoras no armazenamento de grãos (BRACKMANN et al., 2002; FRANCO, 2015; BERGHETTI, 2020; LUDWIG, 2019; LUDWIG et al., 2021b) e sementes (BECUZZI, 2021; SILVA et al., 2018; LUDWIG et al., 2021a), a utilização da atmosfera controlada, torna-se uma ferramenta com grande eficácia em âmbito comercial, podendo garantir venda de valor e gerar maior segurança para as empresas sementeiras e produtores que utiliza-

rão sementes de qualidade e garantia de maior produtividade frente à sementes de menor qualidade fisiológica.

Em suma, compreender o setor sementeiro e como as tecnologias podem auxiliar no seu crescimento se faz necessário, possibilitando assim a geração de empregos e maior segurança ao entregar para o mercado de sementes alto nível de qualidade fisiológica. Entende-se que há várias lacunas a serem estudadas, com o intuito de buscar a melhor performance na utilização da atmosfera controlada frente ao armazenamento de sementes, estabelecer quais os melhores níveis de gases e sua aplicação para as distintas espécies que necessitam armazenamento, verificar sua ação nas diferentes cultivares de grupos de maturidade relativa (GMR) distintos existentes no mercado; custos operacionais e de estruturas em diferentes locais para sua implementação, podendo assim, viabilizar e expandir a utilização da atmosfera controlada no âmbito não somente regional mas também nacionalmente.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

AEBI, H. (1984) Catalase in vitro. *Methods Enzymology* 105:121-126.

AGUIAR, RW de S. et al. Effect of carbon dioxide on quality of rice seeds. **Bioscience Journal**, v. 31, n. 5, p. 1413-1422, 2015.

ALENCAR, E. R., et al. Qualidade dos grãos de soja armazenados em diferentes condições. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, n. 5, p. 606-613, 2009. <https://doi.org/10.1590/s1415-43662009000500014>.

ALENCAR, Ernandes R. de et al. Influence of soybean storage conditions on crude oil quality. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, p. 303-308, 2010.

ÁVILA, M. R. et al. Physiological quality, content and activity of antioxidants in soybean seeds artificially aged. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 34, n. 3, p. 397-407, 2012.

BAKHTAVAR, M.A.; AFZAL I. Climate smart Dry Chain technology for safe storage of quinoa seeds. **Scientific Reports**, v. 10, 2020.

BANKS, H. J.; ANNIS, P. C. Comparative advantage of high CO<sub>2</sub> and low O<sub>2</sub> types of controlled atmospheres for grain storage. In: **Food Preservation by Modified Atmospheres**. Ed. Calderon, M.; Barkai-Golan, R., CRC Press, Boca Raton. pp 93-119, 1990.

BARTOSIK, R.; CARDOSO, L.; RODRÍGUEZ, J. Early detection of spoiled grain stored in hermetic plastic bags (silo-bags) using CO<sub>2</sub> monitoring. In: Proceedings of the 8<sup>th</sup> international conference controlled atmospheres and fumigation of stored products. **Sichuan Publishing House of Science and Technology**, Chengdu, China, p.550-554, 2008.

BECUZZI L.R. Armazenamento de sementes de soja (*Glycine max*) sob atmosfera em fluxo contínuo de gases. **Trabalho de conclusão de curso**. 2021

BERGHETTI, M. R. P. Qualidade fisiológica e físico-química de grãos e sementes de feijão carioca e feijão preto armazenados em atmosfera controlada em temperaturas elevadas. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria. 2020.

BORGHETTI, F. Dormência embrionária. In: FERREIRA, A. G.; BORGHETTI, F. (Org.). **Germinação: do básico ao aplicado**, v.1, p. 109-123, 2004.

CARVALHO, N. M.; NAKAGAWA, J. Sementes: Ciência, Tecnologia e Produção. 5. ed. CASSOL, Flávia Danieli Rech et al. Qualidade fisiológica de lotes de sementes de feijão em função do armazenamento. **Revista Cultivando o Saber**, v. 5, n. 2, p. 85-97, 2012.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB) Acompanhamento da safra brasileira de grãos. Sexto levantamento. v.5, n.6, março 2023. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safra/gaos/boletim-da-safra-de-gaos>. Acesso em 05 de janeiro de 2023.

CORRÊA, Paulo Cesar et al. Isotermas de dessecção de sementes de beterraba. **Revista Engenharia na Agricultura-REVENG**, v. 24, n. 1, p. 15-21, 2016.

COSTA, A. R. et al. Qualidade de grãos de milho armazenados em silos bolsa. **Revista Ciência Agronômica**, v. 41, n. 2, p. 200-207, 2010.

DELOUCHE, J. C.; BASKIN, C. Accelerated aging techniques for predicting the relative storability of seeds lots. **Seed science and technology**, v. 1, n.2, p. 427-452, 1973.

ELIAS, M. C. Fatores que influenciam a aeração e o manejo da conservação de grãos. In: Lorini, I. et al. (Ed.). **Armazenagem de grãos**, Cap. 6.1, p. 311-359, 2002.

FARONI, R. A; SILVA, J. S. Manejo de pragas no ecossistema de grãos armazenados. In: Silva JS. (Org.). **Secagem e armazenagem de produtos agrícolas**. Viçosa, p. 371-406, 2008.

FRANÇA NETO, J. B. et al. A importância do uso de sementes de soja de alta qualidade. **Informativo ABRATES**, v.20, p.037-038, 2010.

FREITAS, L.R.A. et al. Hermetic storage for control of common bean weevil, *Acanthoscelides obtectus* (Say). **Journal Stored Products Research**, v.66, p.1-5, 2016.

GASTÓN A. et al. Mathematical modeling of heat and moisture transfer of wheat stored in plastic bags (silo-bags). **Biosystems Engineering**, v. 104, p. 72- 85, 2009.

IBRO, G. et al. Adoption of cowpea hermetic storage by women in Nigeria, Niger and Burkina Faso. **Journal of Stored Products Research**, v. 58, p. 87-96, 2014.

**International Conference Controlled Atmospheres and Fumigation of stored Products**. Sichuan Publishing House of Science and Technology, Chengdu, China, p.550-554, 2008. Jaboticabal: Funep, 2012. 590p.

KONG, F.; CHANG, S. K. C. Changes in protein characteristics during soybean storage under adverse conditions as related to tofu making. **Journal of Food Agriculture and Food Chemistry**, v. 61, p. 387-393, 2013.

LANE, B.; WOLOSHUK, C. Impact of storage environment on the efficacy of hermetic storage bags. **Journal Stored Products Research**, v. 72, p. 83-89, 2017.

LINKE, W. J. Armazenamento de sementes de soja em atmosfera modificada e controlada e exposição aos raios UV. Dissertação Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria. 2014.

LUDWIG, V. Atmosfera controlada e temperatura de armazenamento na qualidade fisiológica e química de sementes e grãos de soja. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria. 2020.

LUDWIG, V. et al. Impact of controlled atmosphere storage on physiological quality of soybean seed. **Journal of Stored Products Research** v. 90, 2021a.

MORAES, C. P. B. et al. Determinação dos tipos de resistência nos genótipos de feijoeiro ao ataque de *Zabrotes subfasciatus* (Coleoptera: Bruchidae). **Revista Ceres**, Viçosa, v. 58, n. 4, p. 419-424, 2011.

MORENO, M.E.; JIMENEZ, A.S.; VAZQUEZ, M.E. Hermetic storage system preventing the NOOR, M. et al. Comparative effectiveness of Grain Pro Cocoon TM with traditional storage systems against *Tribolium castaneum* (Hbst.), *Rhyzopertha dominica* (F.) and *Sitophilus oryzae* (L.) **African Journal of Agricultural Research**. v. 6, p. 2784-2787, 2011.

PARAGINSKI, Ricardo T. et al. Qualidade de grãos de milho armazenados em diferentes temperaturas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, p. 358-363, 2015.

PESKE, S.T.; VILLELA, F.A.; MENEGHELLO, G.E. **Sementes: fundamentos científicos e tecnológicos**. 3.ed., Pelotas: Editora e Gráfica da UFPel, 2012. 573p.

POPIGINIS, F. Fisiologia da semente. Brasília: Ministério da Agricultura- AGLIPAN, 1985. previsões. **Pesquisa Operacional para o Desenvolvimento**, v.2, n.1, p. 1-86, 2010.

PUZZI, D. **Abastecimento e Armazenagem de Grãos**. Campinas-SP, 2000.

QUEZADA, M. Y. et al. Hermetic storage system preventing the proliferation of *Prostephanus truncatus* horn and storage fungi in maize with different moisture contents. **Postharvest Biology and Technology**, Amsterdam, v. 39, p. 321-326, 2006.

RAJJOU, L. The Effect of  $\alpha$ -Amanitin on the Arabidopsis Seed Proteome Highlights the Distinct Roles of Stored and Neosynthesized mRNAs during Germination. **Plant physiology**, v. 134, n.4, p. 1598-1613, 2011.

RODRÍGUEZ, J. C. et al. Almacenaje de granos en bolsas plásticas: sistema silobag. EEA INTA Balcarce, 2010.

RUPOLLO, Galileu et al. Efeito da umidade e do período de armazenamento hermético na contaminação natural por fungos e a produção de micotoxinas em grãos de aveia. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 30, p. 118-125, 2006.

RUPOLLO, Galileu et al. Pasting, morphological, thermal and crystallinity properties of starch isolated from beans stored under different atmospheric conditions. **Carbohydrate Polymers**, v. 86, n. 3, p. 1403-1409, 2011.

SANTOS, C. M. R.; MENEZES, N. L.; VILLELA, F. A. Modificações fisiológicas e bioquímicas em sementes de feijão no armazenamento. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 27, n. 1, p. 104-114, 2005.

SARTORI, M.R. Armazenamento. In: ARAÚJO, R.S.; RAVA, C.A.; STONE, L.F.; ZIMMERMANN, M.J.O. (Coord.). **Cultura do feijoeiro comum no Brasil**, Piracicaba: Potafos, 1996. p.543-558.

SCHULTZ, RODRIGO A. et al. Propriedades físicas de grãos de soja armazenados em diferentes condições. **Mais soja**, 2017.

SMANIOTTO, Thaís A. de S. et al. Qualidade fisiológica das sementes de soja armazenadas em diferentes condições. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, p. 446-453, 2014.

SOUZA, M.O.; MARQUES, D.V.; SOUZA, G.S. O complexo de soja: aspectos descritivos e VIEIRA, E. H. N.; YOKOYAMA, M. Colheita, processamento e armazenamento. In: VIEIRA, E. H. N.; RAVA, C. A. **Sementes de feijão - produção e tecnologia**, p. 233-248, 2000.

WILLIAMS, S. B.; BARIBUTSA, D.; WOLOSHUK, C. Assessing Purdue Improved Crop Storage (PICS) bags to mitigate fungal growth and aflatoxin contamination. **Journal Stored Products Research**, v. 59, p. 190-196, 2014.

ZEYMER, J S. et al. Desorption isotherms of *Lactuca sativa* seeds. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, p. 568-572, 2017.

ZEYMER, J. S et al. Equilíbrio Higroscópico de Sementes de Linhaça em Diferentes Condições Ambientais de Armazenamento. VII Conferência Brasileira de Pós-Colheita, 2018.