

UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola

**CULTIVO DE FEIJÃO-COMUM COM ÁGUA RESIDUÁRIA
DE SUINOCULTURA: EFEITOS NA PRODUTIVIDADE E
ARMAZENAMENTO DOS GRÃOS**

ELANE CARNEIRO DOS SANTOS

DOURADOS
MATO GROSSO DO SUL
2026

CULTIVO DE FEIJÃO-COMUM COM ÁGUA RESIDUÁRIA DE SUINOCULTURA: EFEITOS NA PRODUTIVIDADE E ARMAZENAMENTO DOS GRÃOS

ELANE CARNEIRO DOS SANTOS
ENGENHEIRA AGRÍCOLA

Orientador(a): Prof^ª. Dra. Cristiane Fernandes Lisboa

Co-Orientadores (as): Fernanda Lamede Ferreira de Jesus
Vanderleia Schoeninger

Dissertação apresentada à Universidade Federal da
Grande Dourados, como parte das exigências do
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola,
para obtenção do título de Mestre.

DOURADOS
MATO GROSSO DO SUL
2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).

S237c Santos, Elane Carneiro Dos

CULTIVO DE FEIJÃO-COMUM COM ÁGUA RESIDUÁRIA DE SUINOCULTURA:
EFEITOS NA PRODUTIVIDADE E ARMAZENAMENTO DOS GRÃOS [recurso eletrônico] /
Elane Carneiro Dos Santos. -- 2026.

Arquivo em formato pdf.

Orientadora: Cristiane Fernandes Lisboa.

Coorientadora: Vanderleia Schoeninger.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)-Universidade Federal da Grande Dourados,
2026.

Disponível no Repositório Institucional da UFGD em:
<https://portal.ufgd.edu.br/setor/biblioteca/repositorio>

1. Pós- colheita. 2. Produção. 3. Sistema de cultivo. 4. Phaseolus Vulgaris. 5. Qualidade
tecnológica. I. Lisboa, Cristiane Fernandes. II. Schoeninger, Vanderleia. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

©Direitos reservados. Permitido a reprodução parcial desde que citada a fonte.



ATA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA POR ELANE CARNEIRO DOS SANTOS, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO "ENGENHARIA AGRÍCOLA".

Aos sete dias do mês de julho do ano de dois mil e vinte e seis, às nove horas, em sessão pública, realizou-se na Universidade Federal da Grande Dourados, a Defesa de Dissertação de Mestrado intitulada **"Cultivo de feijão-comum com água residuária de suinocultura: efeitos na produtividade e armazenamento dos grãos"**, apresentada pela pessoa mestrande Elane Carneiro dos Santos, do Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, à Banca Examinadora constituída pelos membros: Prof.^a Dr.^a Vanderleia Schoeninger/UFGD (presidente/coorientadora), Prof. Dr. Ailson Maciel de Almeida/UFGD (membro titular interno), Prof.^a Dr.^a Debora Pantojo de Souza/UFGD (membro titular interno), Prof.^a Dr.^a Mariana Zampar Toledo/UFGD (membro titular externo). Iniciados os trabalhos, a presidência deu a conhecer à pessoa candidata e aos integrantes da banca as normas a serem observadas na apresentação da Dissertação. Após a pessoa candidata ter apresentado a sua Dissertação, os componentes da Banca Examinadora fizeram suas arguições. Terminada a Defesa, a Banca Examinadora, em sessão secreta, passou aos trabalhos de julgamento, tendo a pessoa candidata obtido Aprovada. Nada mais havendo a tratar, lavrou-se a presente ata, que vai assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Dourados/MS, 07 de julho de 2026.

Documento assinado digitalmente
gov.br VANDERLEIA SCHOENINGER
Data: 08/07/2026 15:24:00-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a Dr.^a Vanderleia Schoeninger
Presidente/coorientadora

Documento assinado digitalmente
gov.br AILSON MACIEL DE ALMEIDA
Data: 09/07/2026 09:04:15-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Ailson Maciel de Almeida
Membro Titular Interno

Documento assinado digitalmente
gov.br DEBORA PANTOJO DE SOUZA
Data: 08/07/2026 20:30:41-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a Dr.^a Debora Pantojo de Souza
Membro Titular Interno

Documento assinado digitalmente
gov.br MARIANA ZAMPAR TOLEDO
Data: 08/07/2026 21:01:47-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a Dr.^a Mariana Zampar Toledo
Membro Titular Externo

(PARA USO EXCLUSIVO DA PROPG)

DEDICATÓRIA

À Deus, que tem me concedido força, coragem e sabedoria para seguir em frente e não desistir deste percurso.

À minha família, especialmente aos meus pais e ao meu irmão, que, sob o sol inclemente e com muito esforço, me proporcionaram as condições para alcançar a sombra do sucesso.

Aos meus avós, Maria e Francisco, que, apesar da distância, nunca deixaram de me apoiar e rezar por mim.

Às minhas amigas Izabelle, Ariane e Raquel, que, com seu apoio incondicional, me fortaleceram a cada crise e foram meu refúgio nos momentos de angústia e desespero.

Dedico!

AGRADECIMENTOS

À Deus que com sua infinita bondade e sabedoria me concedeu força, coragem e sabedoria nos momentos que mais precisei ao longo de toda minha trajetória de vida.

À minha família, Eliana Santos, Edmilson Santos e Paulo Henrique Santos, que foram minha base sólida, permanecendo ao meu lado em todos os momentos, sendo meus maiores incentivadores emocionais e financeiros para que eu pudesse concluir este sonho com êxito.

Aos meus amados e saudosos avós, Maria Raimunda e Francisco Alves, cujas incessantes orações e apoio moral foram essenciais.

À minha orientadora, Cristiane Lisboa por toda a orientação, ensinamentos, paciência e compreensão dedicados ao longo deste percurso.

Às minhas Co-orientadoras Fernanda Lamede e Vanderleia Schoeninger pela supervisão dedicada e constante disposição em me ajudar a conduzir este trabalho.

À Carmilen Raiara Almeida, por toda ajuda dedicada, incentivo, apoio, conselhos e abraço de consolo nos momentos que mais precisei.

Às minhas amigas Ariane Bárbara, Izabelle Lima e Raquel Souza por serem meu ponto de refúgio e consolo nos momentos mais difíceis ao longo desta trajetória.

Aos colegas que tive o privilégio de conhecer na instituição, Gleice, Efrain, Guilherme Alexandre, Stefany, Jheniffer, Rafaela e Mathar, sou imensamente grata, não apenas pelo apoio intelectual, mas também pela ajuda prática no campo e laboratório, que foram fundamentais para o sucesso do meu experimento e para tornar este período mais leve e tranquilo.

Aos técnicos de laboratório, Adriana, Gisa, Camila, Kamila e João por toda orientação, cuidado e ensinamentos ao longo das conduções das análises.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio financeiro e pela oportunidade de desenvolver esta pesquisa, permitindo a continuidade dos meus estudos de pós-graduação.

À Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD), ao Programa de Pós-Graduação e ao seu corpo docente, pelo suporte institucional, pela formação acadêmica proporcionada e pelas relevantes contribuições científicas e profissionais decorrentes das disciplinas cursadas ao longo desta trajetória.

Por fim, expresso minha profunda gratidão a todos que, de alguma forma, seja diretamente ou indiretamente, contribuíram para a realização deste sonho.

RESUMO

O armazenamento de grãos de feijão é uma etapa fundamental para a manutenção da qualidade tecnológica e nutricional do produto, visto que alterações físico-químicas e funcionais podem ocorrer ao longo desse período, modificando os atributos tecnológicos dos grãos. Além disso, condições relacionadas ao sistema de cultivo podem influenciar a qualidade inicial dos grãos e interferir em seu desempenho durante o armazenamento. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a influência do sistema de cultivo com aplicação de água residuária de suinocultura sobre os atributos tecnológicos dos grãos de feijão-comum cultivar TAA Dama durante o armazenamento. O estudo foi conduzido em dois experimentos, sendo o primeiro destinado à avaliação do desempenho agrônômico da cultura e o segundo à avaliação da qualidade dos grãos armazenados durante 180 dias de armazenamento. Foram avaliadas variáveis relacionadas ao crescimento, desenvolvimento e produtividade da cultura, além de atributos tecnológicos dos grãos, como características de cozimento, embebição, sólidos solúveis e totais, integridade e coloração. O experimento de armazenamento foi conduzido em Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC), em esquema fatorial $2 \times 3 \times 6$, considerando dois sistemas de cultivo (com e sem aplicação de água residuária de suinocultura), três tipos de embalagens (PET, polietileno e papel kraft com fechamento zip lock) e seis períodos de armazenamento (0, 36, 72, 108, 144 e 180 dias). Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA), teste de Tukey a 5% de probabilidade, análise de regressão para avaliação do efeito do período de armazenamento e análises multivariadas, incluindo correlação de Pearson, análise de componentes principais (ACP) e análise discriminante por mínimos quadrados parciais (PLS-DA). Os resultados indicaram que o sistema de cultivo influenciou alguns atributos tecnológicos dos grãos, porém o período de armazenamento foi o principal fator responsável pelas alterações observadas. Durante os 180 dias, ocorreram modificações no tempo de cocção, coloração do tegumento, sólidos solúveis, sólidos totais e percentual de grãos inteiros. Os grãos provenientes do cultivo com água residuária apresentaram menor tempo de cocção em determinados períodos e maior percentual de grãos inteiros ao final do armazenamento. As análises multivariadas indicaram que os atributos relacionados à qualidade tecnológica foram os principais responsáveis pela diferenciação dos tratamentos ao longo do período avaliado. Conclui-se que o período de armazenamento exerceu maior influência sobre as alterações dos grãos de feijão, enquanto o sistema de cultivo apresentou efeito pontual sobre determinados atributos tecnológicos. A análise multivariada permitiu identificar que variáveis associadas à cocção, coloração e integridade dos grãos foram importantes para caracterizar as modificações ocorridas durante o armazenamento.

Palavras-chaves: Sistemas de cultivo; qualidade físico-química; pós-colheita; produção.

ABSTRACT

The storage of common bean grains is an essential step for maintaining product quality, since physicochemical and functional changes may occur over time, affecting grain technological attributes. In addition, cultivation conditions may influence the initial grain quality and interfere with their performance during storage. Therefore, this study aimed to evaluate the influence of cultivation systems with swine wastewater application on the technological attributes of common bean grains, cultivar TAA Dama, during storage. The study was conducted through two experiments, the first focused on evaluating crop agronomic performance and the second on assessing grain quality during 180 days of storage. Variables related to crop growth, development, and productivity were evaluated, as well as grain technological attributes, including cooking characteristics, water absorption, soluble and total solids, grain integrity, and color parameters. The storage experiment was conducted in a completely randomized design (CRD), using a $2 \times 3 \times 6$ factorial scheme, considering two cultivation systems (with and without swine wastewater application), three types of packaging (PET, polyethylene, and kraft paper with zip-lock closure), and six storage periods (0, 36, 72, 108, 144, and 180 days). Data were subjected to analysis of variance (ANOVA), Tukey's test at 5% probability, regression analysis to evaluate the effect of storage period, and multivariate analyses, including Pearson correlation, principal component analysis (PCA), and partial least squares discriminant analysis (PLS-DA). The results indicated that the cultivation system influenced some grain technological attributes; however, the storage period was the main factor responsible for the observed changes. Throughout the 180-day storage period, modifications occurred in cooking time, seed coat color, soluble solids, total solids, and percentage of whole grains. Grains obtained from cultivation with swine wastewater showed lower cooking time at specific storage periods and a higher percentage of whole grains at the end of storage. Multivariate analyses indicated that technological quality-related attributes were the main variables responsible for differentiating treatments throughout the evaluated period. It was concluded that storage period had a greater influence on grain changes, while the cultivation system showed punctual effects on specific technological attributes. Multivariate analysis allowed the identification of cooking, color, and grain integrity variables as important indicators for characterizing changes occurring during storage.

Keywords: Cultivation systems; physicochemical quality; post-harvest; production.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de localização da área de estudo.	23
Figura 2. Dados climáticos mensais referentes à temperatura máxima (T _{máx}) e mínima (T _{mín}) e a precipitação pluvial acumulada ocorridos durante o experimento de cultivo de feijão em Dourados – Ms.	24
Figura 3. Aplicação de Calcário nos canteiros.	25
Figura 4. Representação esquemática do delineamento experimental.	26
Figura 5. Preparação dos canteiros.	27
Figura 6. Ilustração do gabarito de plantio utilizado.	27
Figura 7. (A) Semeadura; (B) Desbaste.	28
Figura 8. Cobertura morta entre blocos para controle de plantas daninhas.	28
Figura 9. A) Aplicação fitossanitária no feijoeiro para manejo de insetos-praga; B) Feijoeiro atacado por insetos e doenças.	29
Figura 10. Croqui do sistema de irrigação por gotejamento.	30
Figura 11. Cabeçal de controle equipado com temporizador e válvula solenóide do sistema de irrigação.	30
Figura 12. (A) tensiômetro; (B) Teste de uniformidade.	31
Figura 13. Placas de identificação das parcelas que receberam irrigação com água residuária de suinocultura.	31
Figura 14. Irrigação do feijoeiro com água residuária suína.	32
Figura 15. (A) Impermeabilização da lagoa de dejetos suínos; (B) Acondicionamento do efluente nas bombonas.	33
Figura 16. (A) Acondicionamento das vagens após colhidos; (B) Debulha das vagens; (C) Grãos debulhados e sujos; (D) Limpeza dos grãos.	35
Figura 17. Secador experimental de camada fixa utilizado na secagem dos grãos de feijão.	36
Figura 18. A) Medição de altura de planta; (B) Medição de comprimento de raiz; (C) Pesagem da parte aérea das plantas; (D) Determinação da massa seca das plantas em estufa.	37
Figura 19. Embalagens utilizadas para o acondicionamento dos grãos de feijão durante armazenamento em condições ambientais.	48
Figura 20. Acondicionamento e disposição dos grãos de feijão comum, em diferentes embalagens durante o armazenamento em condições ambientais de laboratório.	49
Figura 21. Termo-higrômetro empregado no monitoramento da temperatura e da umidade relativa do ar no ambiente de armazenamento dos grãos de feijão.	49
Figura 22. Variação temporal da temperatura e da umidade relativa do ar no ambiente de armazenamento dos grãos de feijão-comum, entre julho de 2025 a janeiro de 2026.	50
Figura 23. Procedimento experimental para determinação do tempo de cocção: (A) Posicionamento das hastes sobre os grãos; (B) condução do ensaio de cocção em banho-maria.	51
Figura 24. Etapas do procedimento para determinação da porcentagem de embebição de água antes do cozimento dos grãos de feijão-comum: (A) pesagem da amostra inicial, constituída por grãos uniformes e íntegros; (B) imersão dos grãos em água para hidrata.	51
Figura 25. Aquecimento dos grãos sobre a chapa elétrica.	52
Figura 26. Separação dos grãos inteiros e quebrados.	53
Figura 27. (A) Separação do caldo; (B) Caldo submetido à secagem em estufa.	54
Figura 28. Leitura do Brix no refratômetro digital.	54
Figura 29. Determinação da coloração dos grãos com o auxílio de um colorímetro.	55

Figura 30. Ajuste de regressão linear do tempo de cocção dos grãos de feijão-comum acondicionados em garrafa PET, embalagem kraft e embalagem de polietileno, em função do período de armazenamento.....	59
Figura 31. Regressões das variáveis tecnológicas dos grãos de feijão-comum em função do tempo de armazenamento, considerando os tratamentos de cultivo com aplicação de água residuária suína (CA) e sem aplicação de água residuária suína (AS): (A) tempo de cocção; (B) sólidos solúveis.....	63
Figura 32. Regressões das variáveis tecnológicas dos grãos de feijão-comum em função do tempo de armazenamento, considerando os tratamentos de cultivo com aplicação de água residuária suína (CA) e sem aplicação de água residuária suína (AS): (C) sólidos totais; (D) porcentagem de embebição após o cozimento; e (E) percentual de grãos inteiros.	64
Figura 33. Biplot resultante da análise de componentes principais (ACP) para as condições de armazenamento feijão da cultivar Dama provenientes de sistemas produtivos que utilizaram ou não a água residuária da suinocultura (expressas por) com os parâmetros de qualidade tecnológica dos grãos de (identificados por ●) sendo BRIX (teor de sólidos solúveis), PEANC (porcentagem de embebição de água antes do cozimento), PGI (porcentagem de grãos inteiros após cozimento), PEAC (porcentagem de embebição de água após o cozimento), TC (tempo de cozimento), L* (luminosidade), C* (croma) e h (ângulo hue).	69
Figura 34. Scores plot resultante da análise PLS – DA apresentando a representação gráfica dos escores obtidos (t1 x t2) com as separações para os tratamentos na produção (Com ARS e Sem ARS) e as embalagens empregadas (Kraf, PET e polietileno) durante	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Caracterização química do solo da área experimental, FAECA, Dourados, MS.	24
Tabela 2. Disponibilidade de micronutrientes e textura do solo na área experimental da área experimental, FAECA, Dourados, MS.	25
Tabela 3. Caracterização físico-química e composição mineral da água residuária de suinocultura utilizada no experimento.	34
Tabela 4. Resumo da análise de variância e coeficientes de variação das características altura de planta (ALT), comprimento da raiz (CR), massa fresca da parte aérea (MFPA), massa fresca da raiz (MFR), massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca da raiz (MSR), submetidos ao tratamento com água residuária suína.	38
Tabela 5. Efeitos do tratamento relacionado ao uso de água residuária suína: CA (com aplicação) e AS (ausência de aplicação) sobre a variável massa seca da parte aérea (MSPA).	39
Tabela 6. Resumo da análise de variância e coeficientes de variação das características número de vagens por planta (NV), número de grãos por vagem (NGV), peso de 100 grãos (P100G), produtividade (PROD) e teor de água (TA).	40
Tabela 7. Influência da aplicação da água residuária suína: CA (com aplicação) e AS (ausência de aplicação) sobre a variável número de vagens por planta (NV).	40
Tabela 8. Resumo da análise de variância (quadrado médio) do tempo de cocção (COC), teor de sólidos solúveis (BRIX), sólidos totais (ST), porcentagem de embebição antes da cocção (PEANC), porcentagem de embebição após a cocção (PEAPC) e percentual de grãos inteiros (PGI), em função do tipo de embalagem (TE), tratamentos (TRAT) e tempo (T).	57
Tabela 9. Valores médios de tempo de cocção (COC) em função dos tipos de embalagem ao longo de 6 meses de armazenamento.	58
Tabela 10. Valores médios de tempo de cocção (COC), sólidos solúveis (BRIX), sólidos totais (ST), porcentagem de embebição após o cozimento (PEAPC) e percentual de grãos inteiros (PGI) dos grãos de feijão provenientes dos tratamentos CA (plantas cultivadas com aplicação de água residuária suína) e AS (plantas cultivadas sem aplicação de água residuária suína), avaliados ao longo de 180 dias de armazenamento.	60
Tabela 11. Equações de regressão ajustadas para tempo de cocção, sólidos solúveis, sólidos totais, porcentagem de embebição após o cozimento e percentual de grãos inteiros de feijão provenientes de plantas cultivadas com aplicação de água residuária de suinocultura (AS), em função do tempo de armazenamento.	62
Tabela 12. Resumo da análise de variância (quadrado médio) dos valores médios de luminosidade (L), croma (C*) e ângulo hue (h) de grãos de feijão-comum submetidos a diferentes tipos de embalagem, tratamentos e tempos de armazenamento.	65
Tabela 13. Valores médios de croma (C*) dos grãos de feijão-comum em função do tratamento de cultivo. CA: cultivo com aplicação de água residuária suína; AS: cultivo sem aplicação de água residuária de suinocultura.	66
Tabela 14. Valores médios de luminosidade (L*), croma (C*) e ângulo hue (h) dos grãos de feijão-comum em função do período de armazenamento.	66
Tabela 15. Estimativas das correlações de Pearson entre as variáveis de qualidade tecnológica e de cor do feijão carioca cultivar TAA Dama.	67

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	17
2. CAPÍTULO I - DESEMPENHO AGRONÔMICO DO FEIJÃO-COMUM SOB APLICAÇÃO DE ÁGUA RESIDUÁRIA DE SUINOCULTURA	20
2.1 INTRODUÇÃO	22
2.2 MATERIAL E MÉTODOS	23
2.2.1 Caracterização da área experimental	23
2.2.2 Obtenção e análise das sementes	25
2.2.3 Delineamento Experimental	26
2.2.4 Implantação e Condução do Experimento.....	27
2.2.5 Manejo da irrigação	29
2.2.6 Aplicação da água residuária suína	31
2.2.6.1 Caracterização físico-química da água residuária de suinocultura.....	33
2.2.7 Colheita.....	34
2.2.8 Secagem.....	35
2.2.9 Variáveis Analisadas	36
2.2.10 Análise Estatística	38
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
2.4 CONCLUSÕES.....	41
2.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41
3.1 INTRODUÇÃO	46
3.2 MATERIAL E MÉTODOS	47
3.2.1 Obtenção dos grãos.....	47
3.2.2 Secagem dos grãos	47
3.2.3 Planejamento Experimental.....	48
3.2.4 Variáveis Analisadas	50
3.2.5 Análise Estatística	56
3.3 Análise Multivariada	56
3.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
3.4.1 Qualidade tecnológica e características colorimétricas dos grãos.....	57
3.4.2 Análise Multivariada	67
3.5 CONCLUSÕES.....	71
3.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72

1. INTRODUÇÃO GERAL

O feijão-comum (*Phaseolus vulgaris* L.) é uma das principais leguminosas destinadas à alimentação humana, destacando-se pelo elevado valor nutricional e pela sua importância socioeconômica. Seus grãos constituem fonte relevante de proteínas, fibras, minerais e vitaminas, além de integrarem de forma expressiva a alimentação da população brasileira (Mullins; Arjmandi, 2021; Pinzón-Sandoval; Carvalho Silva; Marchiori, 2024).

No Brasil, o cultivo do feijoeiro ocorre em diferentes regiões e épocas do ano, permitindo a obtenção de três safras. Entretanto, o desempenho da cultura depende diretamente da disponibilidade de água e nutrientes, especialmente durante os períodos críticos de desenvolvimento, uma vez que o déficit hídrico pode comprometer o crescimento e a produtividade (Coelho *et al.*, 2023; Gamba *et al.*, 2025).

Diante da crescente demanda pelos recursos hídricos, o uso agrícola de águas residuárias surge como alternativa para reduzir a utilização de fontes convencionais de água. Nesse contexto, destaca-se a água residuária da suinocultura, que pode fornecer água e nutrientes às culturas, além de favorecer o reaproveitamento de resíduos gerados pela atividade pecuária (Aneja *et al.*, 2024; Christou *et al.*, 2024).

Entretanto, os efeitos dessa prática não devem ser avaliados somente em relação à produtividade. As condições de cultivo e de nutrição das plantas podem também refletir nas características dos grãos formados e, conseqüentemente, em seu comportamento após a colheita. Dessa forma, torna-se importante compreender se o uso da água residuária de suinocultura interfere também na qualidade dos grãos destinados ao armazenamento.

Durante o armazenamento, os grãos de feijão estão sujeitos a alterações físicas, químicas e bioquímicas que podem comprometer sua qualidade. Entre as principais mudanças estão o escurecimento do tegumento, a redução da capacidade de hidratação, o aumento do tempo de cocção e alterações na textura, cuja intensidade depende das condições e do período de armazenamento (Bento *et al.*, 2021b; Vital *et al.*, 2016).

Nesse processo, o tipo de embalagem constitui importante fator de conservação, pois interfere nas trocas de umidade e gases entre os grãos e o ambiente. Sistemas de acondicionamento adequados podem retardar alterações indesejáveis e contribuir para a manutenção das características tecnológicas e comerciais do produto ao longo do armazenamento (Sousa *et al.*, 2023; Yue *et al.*, 2024).

Assim, a avaliação integrada das etapas de produção e pós-colheita permite compreender não apenas os efeitos da água residuária de suinocultura sobre o desempenho agrônômico do feijoeiro, mas também seus possíveis reflexos sobre a qualidade e a conservação dos grãos, possibilitando assim relacionar as condições de cultivo às transformações ocorridas posteriormente durante o armazenamento.

Diante do exposto, esta pesquisa teve como objetivos:

- i) avaliar o efeito da irrigação com água residuária de suinocultura sobre as características agrônômicas e a produtividade do feijão-comum;
- ii) ii) determinar as alterações tecnológicas dos grãos durante o armazenamento em função do uso de água residuária de suinocultura no cultivo; e
- iii) iii) avaliar a influência de diferentes tipos de embalagem na preservação das propriedades tecnológicas dos grãos durante o armazenamento.

A dissertação foi estruturada em dois capítulos:

Capítulo I – Desempenho agrônômico do feijão-comum sob aplicação de água residuária de suinocultura;

Capítulo II – Conservação pós-colheita de grãos de feijão-comum: efeitos da fertirrigação com água residuária de suinocultura e do tipo de embalagem durante o armazenamento.

1.1 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEJA, Viney P. et al. From pollution to resource: advancing swine waste treatment in the USA. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 8, e1450649, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1450649>.

BENTO, Juliana Aparecida Correia et al. Factors affecting the cooking quality of stored carioca beans (*Phaseolus vulgaris*). **Italian Journal of Food Science**, v. 33, n. 4, p. 43-56, 2021. DOI: <https://doi.org/10.15586/ijfs.v33i4.2025>.

CHRISTOU, Anastasis et al. Sustainable wastewater reuse for agriculture. **Nature Reviews Earth & Environment**, v. 5, p. 504-521, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1038/s43017-024-00560-y>.

COELHO, Anderson Prates et al. Irrigation management of common bean cultivars with contrasting growth habits. **Scientia Agricola**, v. 80, e20220038, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2022-0038>.

GAMBA, V. L. et al. Effect of deficit irrigation on the growth parameters, yield and water use efficiency of common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) under foliar selenium application. **Journal of Engineering in Agriculture and the Environment**, v. 11, n. 2, p. 1-13, 2025. DOI: <https://doi.org/10.37017/jeae-volume11-no2.2025-2>.

MULLINS, Amy P.; ARJMANDI, Bahram H. Health benefits of plant-based nutrition: focus on beans in cardiometabolic diseases. **Nutrients**, v. 13, n. 2, e519, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu13020519>.

PINZÓN-SANDOVAL, Elberth Hernando; CARVALHO SILVA, Wellington; MARCHIORI, Paulo Eduardo Ribeiro. Fenologia, padrões de acúmulo e graus-dia de cultivo em feijoeiro. **Revista de Ciências Agrícolas**, v. 41, n. 3, e3239, 2024. DOI: <https://doi.org/10.22267/rcia.20244103.239>.

SOUSA, Guiomar Almeida et al. Qualidade nutricional e armazenamento de variedades de feijão-caupi cultivados no Juruá, Acre. **DELOS: Desarrollo Local Sostenible**, v. 16, n. 43, p. 752-773, 2023. DOI: <https://doi.org/10.55905/rdelosv16.n43-017>.

VITAL, Rayane de Jesus; BASSINELLO, Priscila Zaczuk; MENDONÇA, Marina Aparecida de Sousa. Relação entre escurecimento e endurecimento de feijões carioca (*Phaseolus vulgaris* L.) durante armazenamento. In: SEMINÁRIO JOVENS TALENTOS, 10., 2016, Santo Antônio de Goiás. **Coletânea dos resumos apresentados**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2016. p. 27.

YUE, Shuangshuang et al. Recent progress of biodegradable polymer package materials: nanotechnology improving both oxygen and water vapor barrier performance. **Nanomaterials**, v. 14, n. 4, e338, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/nano14040338>.

2. CAPÍTULO I - DESEMPENHO AGRONÔMICO DO FEIJÃO-COMUM SOB APLICAÇÃO DE ÁGUA RESIDUÁRIA DE SUINOCULTURA

RESUMO

O feijão-comum (*Phaseolus vulgaris* L.) constitui uma cultura de grande importância no Brasil, em razão do elevado valor nutricional de seus grãos e de sua relevância cultural na alimentação da população. A elevada demanda por esse alimento requer a manutenção de sistemas produtivos eficientes. Além disso, por apresentar sensibilidade à disponibilidade de água no solo, a cultura depende de práticas de manejo hídrico que contribuam para a produtividade e para o uso sustentável dos recursos naturais. Nesse contexto, o aproveitamento de efluentes gerados nas atividades agropecuárias pode representar uma alternativa para integrar produção agrícola e sustentabilidade ambiental. Entre esses efluentes, destaca-se a água residuária de suinocultura, cuja destinação incorreta pode provocar impactos ambientais. Entretanto, quando realizada de maneira adequada, permite o aproveitamento da água, da matéria orgânica e dos nutrientes presentes em sua composição, podendo contribuir para o desenvolvimento das plantas e reduzir os efeitos decorrentes de seu descarte inadequado no meio ambiente. Diante desse contexto, objetivou-se avaliar os efeitos da aplicação de água residuária de suinocultura sobre as características agronômicas e os componentes de produção do feijão-comum, cultivar TAA Dama. O experimento foi conduzido em Delineamento em Blocos Casualizados (DBC), com dois tratamentos: CA, correspondente à aplicação de água residuária de suinocultura, e AS, referente à ausência de aplicação do efluente. Os tratamentos foram distribuídos em três blocos, com quatro repetições por tratamento em cada bloco, totalizando 24 parcelas experimentais. A irrigação foi realizada por gotejamento, com manejo baseado na tensão da água no solo. A aplicação da água residuária teve início aos 30 dias após a emergência das plântulas e foi encerrada quando as plantas atingiram o estágio fenológico de maturação. O efluente foi aplicado manualmente, com o auxílio de um regador, uma vez por semana, no volume de 10 L por parcela do tratamento CA, totalizando 100 L por parcela durante o período experimental. Foram avaliados a altura das plantas (cm), o comprimento das raízes (cm), as massas fresca e seca da parte aérea e das raízes (g planta^{-1}), o número de vagens por planta ($\text{vagens planta}^{-1}$), o número de grãos por vagem (grãos vagem^{-1}), a massa de 100 grãos (g), a produtividade de grãos (kg ha^{-1}) e o teor de água dos grãos (%). A aplicação de água residuária de suinocultura proporcionou maior acúmulo de massa seca na parte aérea e maior número de vagens por planta. Para as demais características agronômicas avaliadas, não foram observadas diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos, o que pode estar relacionado à fertilidade inicial do solo, possivelmente suficiente para atender grande parte das exigências nutricionais da cultura.

Palavras-chave: efluente suinícola; reúso agrícola; biomassa vegetal; produtividade.

ABSTRACT

Common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) is a crop of considerable importance in Brazil due to the high nutritional value of its grains and its cultural relevance in the population's diet. The high demand for this food requires the maintenance of efficient production systems. Furthermore, because common bean is sensitive to soil water availability, its cultivation depends on water management practices that support crop productivity and the sustainable use of natural resources. In this context, the agricultural reuse of effluents generated by livestock activities may represent an alternative for integrating crop production with environmental sustainability. Among these effluents, swine wastewater stands out because its improper disposal may cause adverse environmental impacts. When properly managed for agricultural purposes, it enables the reuse of water, organic matter, and nutrients contained in its composition, potentially contributing to plant development and reducing the environmental impacts associated with its disposal. Therefore, this study aimed to evaluate the effects of swine wastewater application on the agronomic traits and yield components of the common bean cultivar TAA Dama. The experiment was conducted in a Randomized Block Design (RBD) with two treatments: CA, corresponding to swine wastewater application, and AS, corresponding to the absence of effluent application. The treatments were arranged in three blocks, with four replicates per treatment within each block, totaling 24 experimental plots. Irrigation was performed using a drip irrigation system, with management based on soil water tension. Swine wastewater application began 30 days after seedling emergence and was discontinued when the plants reached physiological maturity. The effluent was manually applied once a week using a watering can, at a volume of 10 L per plot assigned to the CA treatment, totaling 100 L per plot throughout the experimental period. The following variables were evaluated: plant height (cm), root length (cm), fresh and dry masses of shoots and roots (g plant^{-1}), number of pods per plant (pods plant^{-1}), number of grains per pod (grains pod^{-1}), 100-grain mass (g), grain yield (kg ha^{-1}), and grain moisture content (%). Swine wastewater application increased shoot dry matter accumulation and the number of pods per plant. No statistically significant differences were observed between treatments for the other agronomic traits, which may be associated with the initial soil fertility, possibly sufficient to meet a substantial proportion of the crop's nutritional requirements.

Keywords: swine effluent; agricultural reuse; plant biomass; productivity.

2.1 INTRODUÇÃO

O feijão-comum (*Phaseolus vulgaris* L.) apresenta elevada importância socioeconômica no Brasil e, juntamente com o arroz, constitui uma das principais bases da alimentação da população (Ferreira; Barrigossi, 2021). Embora seja cultivado em diferentes condições edafoclimáticas, a cultura apresenta sensibilidade ao déficit hídrico em razão do sistema radicular superficial e do ciclo relativamente curto. Dessa forma, a disponibilidade de água representa um fator determinante para o crescimento, o desenvolvimento e a produtividade das plantas (Campos; Santos; Nacarath, 2021).

A exigência hídrica da cultura assume maior relevância diante da pressão exercida pela agricultura sobre os recursos naturais. A intensificação da produção agrícola, impulsionada pelo crescimento populacional e pelo aumento da demanda por alimentos, tem ampliado a necessidade de estratégias voltadas ao uso racional da água. Considerando que a agricultura responde por cerca de 70% do consumo mundial de água doce, torna-se necessário buscar fontes alternativas capazes de complementar o suprimento hídrico das culturas (Silva; Pereira, 2019).

Nesse contexto, o aproveitamento agrícola de efluentes tratados apresenta potencial para atender parte das demandas hídricas e nutricionais das plantas, além de reduzir os impactos decorrentes do descarte inadequado desses resíduos. Entre os efluentes agropecuários com possibilidade de uso agrícola, destaca-se a água residuária de suinocultura, devido ao caráter intensivo da atividade e ao elevado volume de dejetos gerados. Quando manejados de forma inadequada, esses resíduos podem causar a contaminação do solo e dos recursos hídricos (Piaia *et al.*, 2023).

A digestão anaeróbia em biodigestores possibilita a redução da carga orgânica dos efluentes e a obtenção de biogás e biofertilizante. O biogás pode ser empregado na geração de energia elétrica ou térmica, enquanto o efluente estabilizado, por conter nutrientes como nitrogênio, fósforo e potássio, pode contribuir para a fertilidade do solo e reduzir parcialmente a dependência de fertilizantes minerais. Essa forma de aproveitamento integra produção agrícola, tratamento de resíduos e sustentabilidade ambiental (Chernicharo, 2016; Lins *et al.*, 2022).

A fertirrigação com água residuária de suinocultura tem apresentado resultados favoráveis sobre os atributos do solo e o desempenho produtivo de culturas como soja e milho (Lima *et al.*, 2023; Maciel *et al.*, 2024). Entretanto, seus efeitos sobre o feijão-comum ainda são pouco explorados, especialmente quanto ao desempenho agrônômico em condições

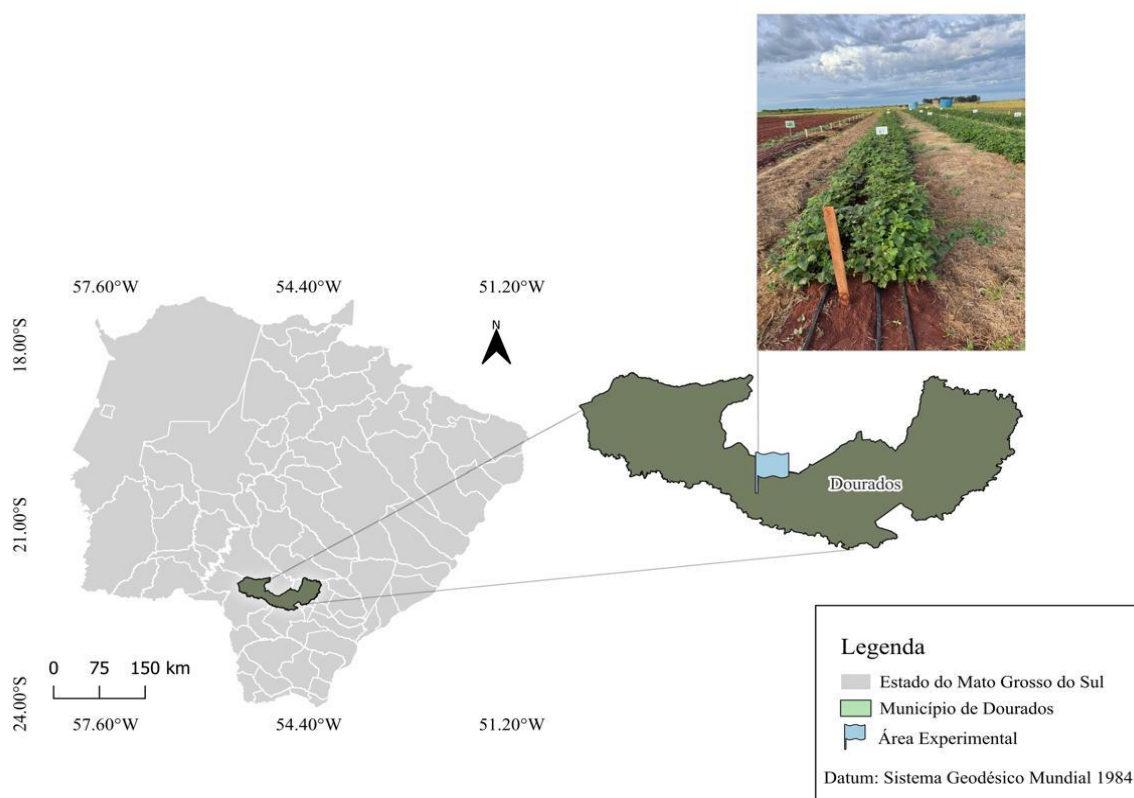
específicas de cultivo. Diante disso, este estudo teve como objetivo avaliar a influência da fertirrigação com água residuária de suinocultura sobre o desempenho agrônômico do feijão-comum em uma região de transição entre o Cerrado e a Mata Atlântica, no sul de Mato Grosso do Sul.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1 Caracterização da área experimental

O experimento de campo foi implantado em uma área da Fazenda Experimental de Ciências Agrárias (FAECA), da Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD), localizada no município de Dourados/MS, nas coordenadas de 22°13'60" de latitude Sul, 54°59'14" de longitude Oeste e 430 m de altitude (Figura 1). O clima da região de Dourados é do tipo Aw, caracterizado como tropical com estação seca no inverno, verões quentes e chuvosos e temperaturas mais amenas durante o período de inverno (Soares *et al.*, 2025).

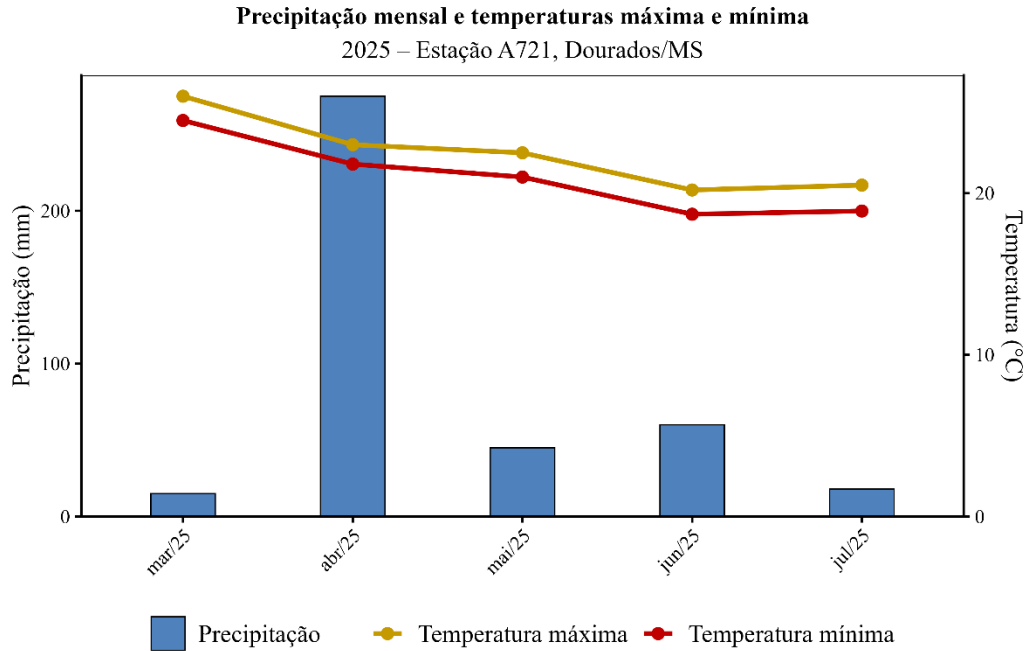
Figura 1. Mapa de localização da área de estudo.



Fonte: Os autores (2026).

As médias mensais climáticas referentes à temperatura (máxima e mínima) e a precipitação pluvial ocorrida no período do experimento, compreendido entre 23 de março de 2025 e 11 de julho de 2025, estão apresentadas na Figura 2.

Figura 2. Dados climáticos mensais referentes à temperatura máxima (T_{máx}) e mínima (T_{mín}) e a precipitação pluvial acumulada ocorridos durante o experimento de cultivo de feijão em Dourados – Ms.



Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia – INMET (2026).

Previamente à instalação do experimento, foram coletadas amostras de solo na camada de 0–20 cm, com o objetivo de realizar a caracterização físico-química, possibilitando a descrição das condições iniciais da área, a interpretação dos resultados e conseguinte a verificação da necessidade de calagem ou de outras correções prévias ao plantio que garantam o desenvolvimento adequado da cultura.

A análise química do solo indicou, ausência de alumínio trocável ($m = 0\%$) e saturação por bases (V) de 61,53%, indicando que, embora não houvesse toxicidade por Al^{3+} , o valor de V encontrava-se ligeiramente abaixo do recomendado para o cultivo do feijão (Tabela 1).

Tabela 1. Caracterização química do solo da área experimental, FAECA, Dourados, MS.

Prof.	PH	P (mehl)	K	Al	Ca	Mg	H+Al	SB	T	V	m	M.O
m	CaCl ₂	mg dm ⁻³		cmolc dm ⁻³						%		g dm ⁻³
0-0,2	5,1	9,8	0,55	0,00	5,18	1,98	4,82	7,71	12,53	61,53	0,00	24,73

P(mehl)= Fósforo Mehlich; SB= Soma de bases; T= CTC a pH 7,0; m= Sat. Alumínio; pH CaCl₂ 0,01mol L⁻¹; P (mehl) Ca, Mg e Al= KCl 1,0 mol L⁻¹; H+Al= Tampão SMP pH 7,5; MO= método colorimétrico.

Fonte: Laboratório Sinergia (2025).

De acordo com Raij *et al.* (1997), a cultura apresenta melhor desempenho quando o V é ajustado para 70% (Bissani *et al.*, 2008). Assim, optou-se pela aplicação de calcário com

PRNT de 80% um mês antes da semeadura, a fim de adequar o solo às exigências nutricionais da espécie (Figura 3).

Figura 3. Aplicação de Calcário nos canteiros.



Fonte: Os autores (2026).

Quanto aos atributos de fertilidade, os resultados da análise de solo (Tabela 2) permitiram concluir que, de modo geral, os teores de micronutrientes encontravam-se em níveis satisfatórios quando comparados às recomendações de adubação da Embrapa para o cultivo do feijão (Carvalho; Silveira, 2023).

Tabela 2. Disponibilidade de micronutrientes e textura do solo na área experimental da área experimental, FAECA, Dourados, MS.

Prof.	B	CU	Fe	Mn	Zn	Areia	Argila	Silte
(m)			mg dm ⁻³				g/kg	
0 - 0,2	0,51	14,8	24,6	57,4	2,9	123	664	213

B = (água quente); K, Cu, Fe, Mn e Zn= (Mehlich-1); Areia, Argila e Silte = método da pipeta.

Fonte: Laboratório Sinergia (2026).

Ademais, a análise granulométrica, evidenciada na Tabela 2, indicou 664 g kg⁻¹ de argila, 123 g kg⁻¹ de areia e 213 g kg⁻¹ de silte, o que, de acordo com o diagrama do triângulo textural, permite classificar o solo como de textura argilosa (Lemos; Santos, 1984).

2.2.2 Obtenção e análise das sementes

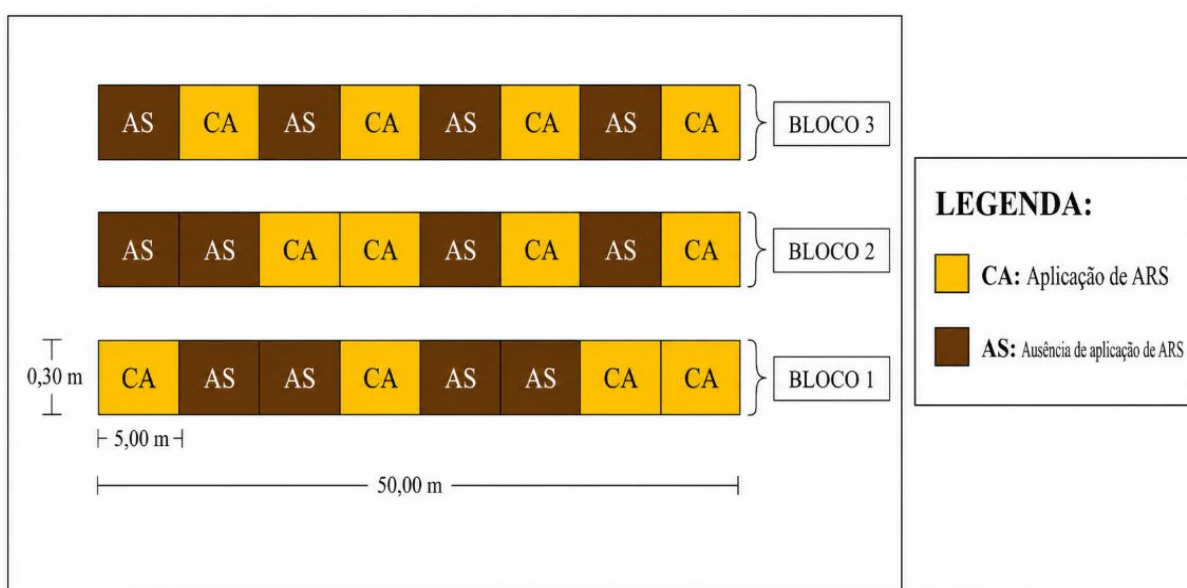
Para o cultivo, foram utilizadas sementes de feijão-comum do grupo comercial carioca, cultivar TAA Dama. Segundo dados do Registro Nacional de Cultivares, essa cultivar foi registrada em 8 de julho de 2013, sob o número 31005, tendo como mantenedora a empresa Agropecuária Terra Alta S/S Ltda. Na consulta realizada em 2019, constavam no RNC 372 cultivares de *Phaseolus vulgaris* L. registradas no país (BRASIL, 2019). Entretanto, de acordo com Rodrigues (2018), a genealogia da cultivar TAA Dama é desconhecida.

Para avaliar a qualidade fisiológica, realizou-se o teste de germinação em quatro repetições de 50 sementes, conforme as Regras para Análise de Sementes (BRASIL, 2009). As sementes foram dispostas em papel Germitest umedecido com água destilada na proporção de 2,5 vezes a massa do papel seco, e os rolos mantidos a 25 °C por nove dias. A primeira contagem (PCG%) foi realizada no quinto dia e a germinação final (G%) no nono dia, com os resultados expressos em percentual de plântulas normais.

2.2.3 Delineamento Experimental

O delineamento experimental adotado foi em blocos casualizado (DBC) com 2 tratamentos (CA: aplicação de água residuária suína e AS: ausência de aplicação de água residuária suína.) em 3 blocos e com 4 repetições de cada tratamento por bloco, perfazendo um total de 24 parcelas experimentais (Figura 4).

Figura 4. Representação esquemática do delineamento experimental.



Fonte: Os autores (2026)

Cada bloco foi constituído por uma estrutura de 50 m de comprimento, 5 m de largura e 0,30 m de altura, contendo oito parcelas experimentais, com área de 5 m² cada. As parcelas foram estabelecidas com espaçamento de 1 m entre si e delimitadas com corda, a fim de evitar a interferência da água residuária de suinocultura (ARS) entre parcelas adjacentes. Posteriormente, realizou-se sorteio aleatório para determinar as parcelas submetidas à aplicação de ARS e aquelas mantidas sem aplicação, conforme apresentado na Figura 5.

2.2.4 Implantação e Condução do Experimento

Para a implantação do experimento, foram construídos três canteiros de terra utilizando um trator Ford 6610 acoplado a uma enxada rotativa encanteirador Lavrale L90, conforme ilustrado na Figura 5.

Figura 5. Preparação dos canteiros.



Fonte: Os autores (2026).

A semeadura foi realizada em março de 2025, obedecendo à janela de plantio recomendada pela Companhia Nacional de Abastecimento (Conab) para o estado de Mato Grosso do Sul (CONAB, 2022). O procedimento ocorreu de forma manual, utilizando-se um gabarito confeccionado em madeira, no qual foram fixados parafusos posicionados de acordo com as dimensões previamente estabelecidas para o espaçamento entre plantas e a profundidade de deposição das sementes (Figura 6).

Figura 6. Ilustração do gabarito de plantio utilizado.



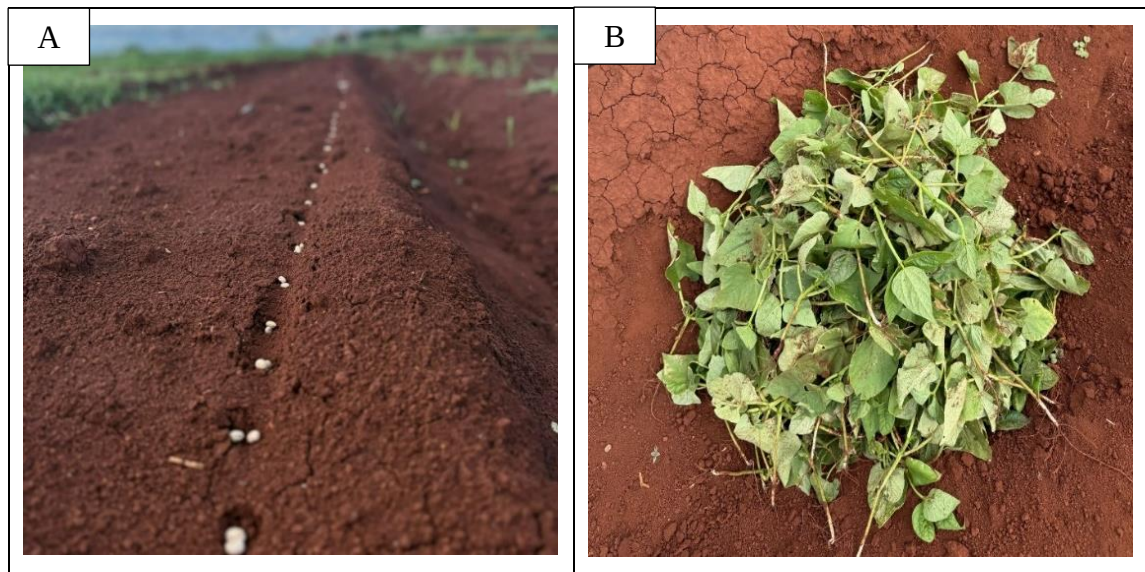
Fonte: Os autores (2026).

O plantio seguiu as recomendações técnicas da Embrapa para o cultivo de feijão no estado (Posse *et al.*, 2010). Em cada canteiro foram implantadas três fileiras de plantas, com espaçamento de 0,40 m entre linhas e bordaduras laterais de 0,10 m. O arranjo populacional correspondeu a 12 plantas por metro linear, resultando em um espaçamento médio de

aproximadamente 0,083 m entre plantas na linha. As sementes foram depositadas a uma profundidade de 0,03 m.

Semeou-se duas sementes por leito de plantio para assegurar a germinação de pelo menos uma planta (Figura 7A), evitando a necessidade de replantio e assegurando que todas tivessem o mesmo tempo de desenvolvimento. Após a emergência das plântulas, realizou-se o desbaste, estabelecendo-se então, o espaçamento determinado previamente (Figura 7B).

Figura 7. (A) Semeadura; (B) Desbaste.



Fonte: Os autores (2026).

O manejo de plantas daninhas foi realizado por meio de arranquio manual durante todo o ciclo da cultura. Como estratégia complementar, empregou-se cobertura morta proveniente das roçagens de gramíneas realizadas nas áreas da instituição, a qual foi distribuída uniformemente sobre a área experimental, abrangendo as laterais e os intervalos entre os canteiros, com o objetivo de reduzir a emergência de novas plantas infestantes (Figura 8).

Figura 8. Cobertura morta entre blocos para controle de plantas daninhas.

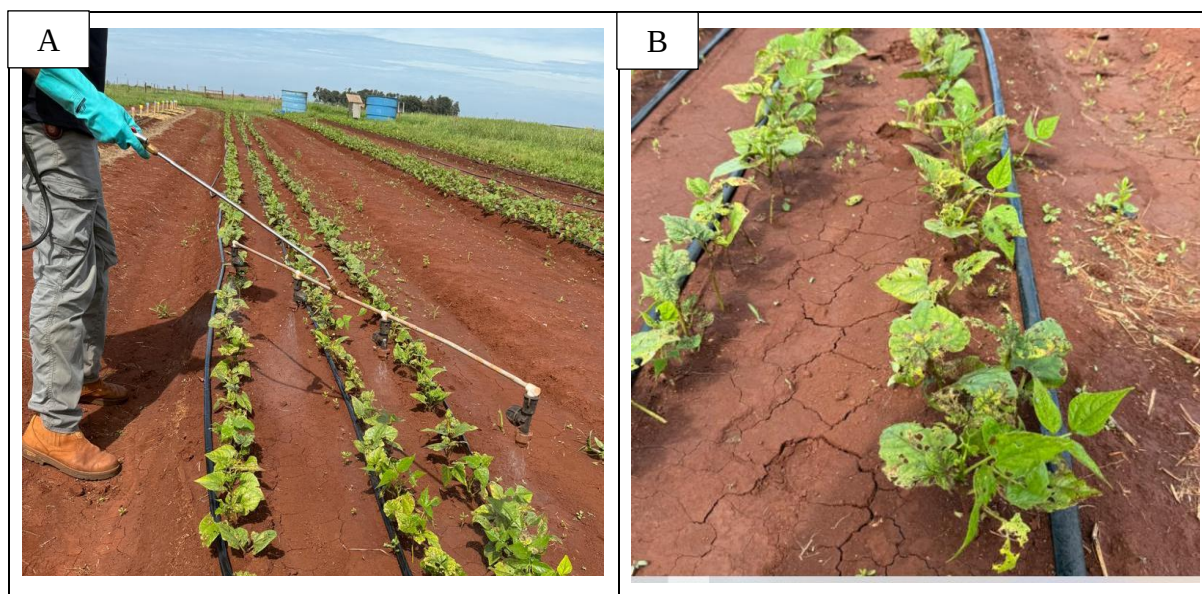


Fonte: Os autores (2026).

O manejo fitossanitário foi conduzido por meio de controle químico, em conformidade com as recomendações de uso e segurança estabelecidas nos registros oficiais dos produtos para a cultura do feijoeiro. Aos 30 dias após a emergência, registrou-se infestação de vaquinha-verde-amarela (*Diabrotica speciosa*), sendo realizada a aplicação do inseticida Connect® na dose de 300 mL ha⁻¹. Aos 40 dias, constatou-se a presença de percevejos (Hemiptera: Pentatomidae), para os quais se empregou o inseticida Engeo Pleno® na dose de 100 mL ha⁻¹.

Aos 60 dias, observou-se a ocorrência de antracnose, causada por *Colletotrichum lindemuthianum*, sendo realizada a aplicação do fungicida Score® na dose de 0,30 L ha⁻¹. Todas as pulverizações foram efetuadas com pulverizador costal manual devidamente calibrado, garantindo uniformidade na deposição da calda (Figura 9A). Desde então, o plantio foi monitorado diariamente, e novas intervenções foram realizadas sempre que se observou a presença das pragas-alvo ou qualquer manifestação inicial de sintomas das doenças (Figura 9B).

Figura 9. A) Aplicação fitossanitária no feijoeiro para manejo de insetos-praga; B) Feijoeiro atacado por insetos e doenças.

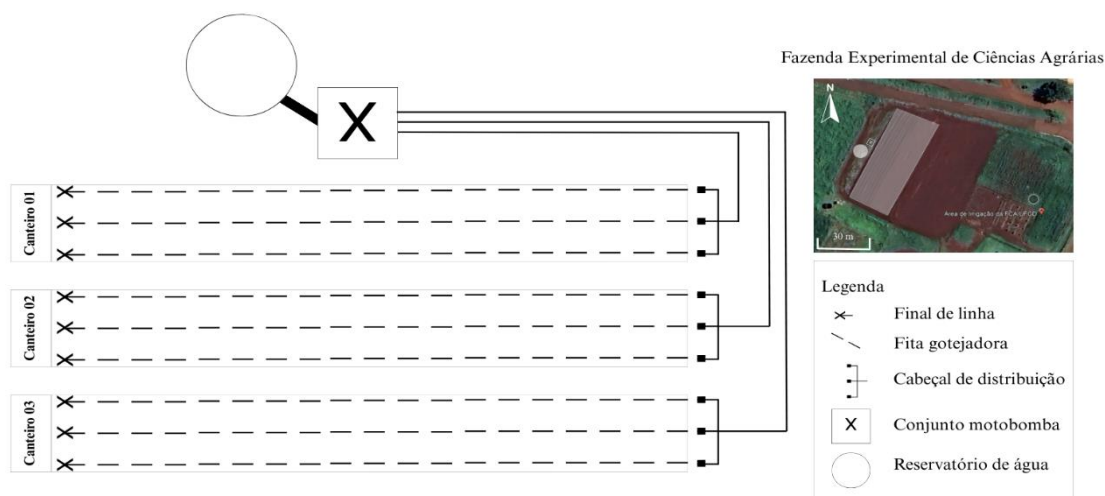


Fonte: Os autores (2026).

2.2.5 Manejo da irrigação

A área experimental dispunha de um sistema de irrigação automatizado, com os seguintes componentes: conjunto motobomba, de 1/3 de cv; fita gotejadora 1,6 l.h⁻¹, com emissores espaçados em 0,2 m, conforme ilustra a Figura 10.

Figura 10. Croqui do sistema de irrigação por gotejamento.



Fonte: Os autores (2026).

A automação do sistema foi realizada por meio de temporizadores e válvulas solenóides (Figura 11), para setorização do sistema de irrigação em três setores, cada setor irrigava um canteiro de forma individual.

Figura 11. Cabeçal de controle equipado com temporizador e válvula solenóide do sistema de irrigação.

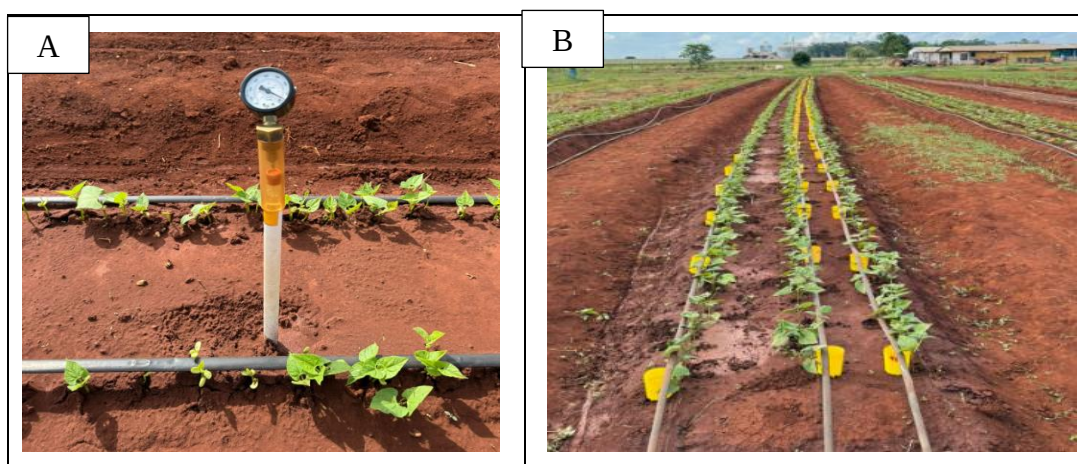


Fonte: Os autores (2026).

Foram aplicados os tempos de funcionamento estimados para cada setor individualmente, em paralelo, no temporizador que controlava o conjunto motobomba, e no temporizador que acionava a válvula solenóide. O manejo foi realizado individualmente em cada setor, de modo a garantir o atendimento à pressão de serviço dos emissores, especificada em 10 mca.

O manejo da irrigação foi realizado com base na tensão da água no solo, monitorada por tensiômetros instalados a 20 cm de profundidade em cada canteiro (Figura 12A). Antes da implantação do experimento, avaliou-se a uniformidade do sistema por meio dos coeficientes de Christiansen (CUC) e de Distribuição (CUD) (Christiansen, 1942; Merriam; Keller, 1978) (Figura 12B). Os valores obtidos, de 93,47% e 90,07%, respectivamente, foram classificados como excelentes segundo Mantovani (2001).

Figura 12. (A) tensiômetro; (B) Teste de uniformidade.



Fonte: Os autores (2026).

2.2.6 Aplicação da água residuária suína

Para garantir a identificação das parcelas, foram confeccionadas placas de papel A4 plastificado, resistentes ao sol e à chuva. Essas placas foram fixadas em ripas de madeira e colocadas no centro de cada parcela, assegurando a visibilidade e durabilidade das marcações durante o experimento (Figura 13).

Figura 13. Placas de identificação das parcelas que receberam irrigação com água residuária de suinocultura.



Fonte: Os autores (2026).

A aplicação da água residuária de suinocultura teve início aos 30 dias após a emergência das plântulas e foi encerrada quando as plantas de feijão atingiram o estágio fenológico de maturação. Cada parcela correspondente ao tratamento com efluente recebeu semanalmente 10 L de água residuária, totalizando 100 L por parcela durante o período experimental. Considerando a área de 5 m² de cada unidade experimental, esse volume correspondeu a 20 m³ ha⁻¹ por aplicação e a uma taxa acumulada de 200 m³ ha⁻¹.

A definição da taxa aplicada teve como referência as faixas utilizadas em estudos anteriores com água residuária de suinocultura em culturas anuais (Dal Bosco *et al.*, 2008; Prior *et al.*, 2015), bem como a necessidade de distribuir o efluente uniformemente, sem provocar escoamento superficial. As aplicações foram realizadas manualmente, com o auxílio de um regador, conforme ilustrado na Figura 14.

Figura 14. Irrigação do feijoeiro com água residuária suína.



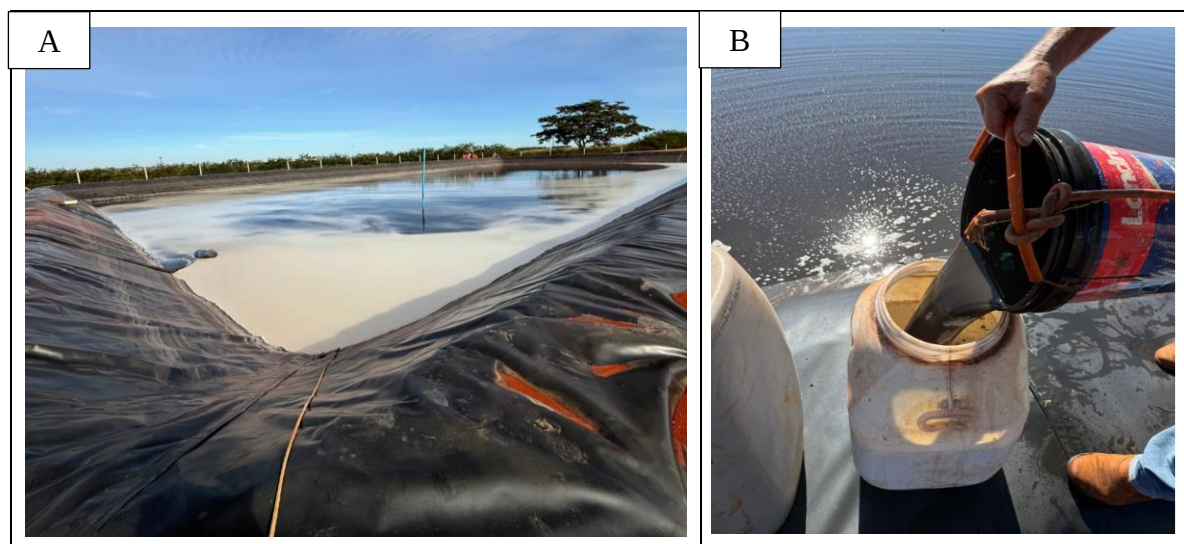
Fonte: Os autores (2026).

O efluente utilizado foi proveniente de uma suinocultura situada em Itaporã/MS, sendo tratado em um biodigestor de fluxo contínuo. Nesse sistema anaeróbico, os dejetos provenientes das baias dos suínos e das águas de lavagem das instalações são direcionados ao biodigestor, onde ocorre a decomposição da matéria orgânica em ambiente sem oxigênio, resultando na geração de biogás e efluente tratado. Após a remoção da fração gasosa, o efluente é transferido para duas lagoas de armazenamento localizadas na granja, por meio de um sistema de bombeamento.

As lagoas são impermeabilizadas com lonas de polietileno, evitando a contaminação do solo (Figura 15A). Nesses reservatórios, o processo de sedimentação permite a separação dos

sólidos suspensos, garantindo a qualidade do efluente antes de sua utilização no campo. O efluente, após ser tratado nas lagoas, foi retirado com auxílio de baldes, transferido e armazenado em bombonas com capacidade de 50 litros para posterior transporte até a área de estudo (Figura 15B).

Figura 15. (A) Impermeabilização da lagoa de dejetos suínos; (B) Acondicionamento do efluente nas bombonas.



Fonte: Os autores (2026).

2.2.6.1 Caracterização físico-química da água residuária de suinocultura

Para a caracterização físico-química da água residuária de suinocultura, foi coletada uma amostra representativa do efluente, em conformidade com os procedimentos estabelecidos no Guia Nacional de Coleta e Preservação de Amostras da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2011).

Após a coleta, a amostra foi encaminhada ao laboratório para a determinação de seus atributos físico-químicos e de sua composição mineral. Foram avaliados a temperatura, o pH, a condutividade elétrica, a demanda bioquímica de oxigênio, a demanda química de oxigênio, os sólidos totais e os sólidos suspensos totais. Também foram determinadas as concentrações de nitrogênio total (N total), fósforo (P), potássio (K), sódio (Na), boro (B), ferro (Fe), cobre (Cu), zinco (Zn), molibdênio (Mo) e manganês (Mn).

As determinações analíticas foram conduzidas de acordo com os métodos descritos no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, e os resultados obtidos são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Caracterização físico-química e composição mineral da água residuária de suinocultura utilizada no experimento.

Parâmetro	Unidade	Resultado
Temperatura da amostra	°C	22
Demanda bioquímica de oxigênio (DBO)	mg O ₂ L ⁻¹	81,3
Boro (B)	mg L ⁻¹	2,49
Fósforo (P)	mg L ⁻¹	49,52
Ferro (Fe)	mg L ⁻¹	6,15
Cobre (Cu)	mg L ⁻¹	6,25
Sólidos totais	mg L ⁻¹	18,43
Potássio (K)	mg L ⁻¹	142,51
Sódio (Na)	mg L ⁻¹	238,96
Zinco (Zn)	mg L ⁻¹	3,22
Condutividade elétrica	µS cm ⁻¹	16.424,00
Demanda química de oxigênio (DQO)	mg O ₂ L ⁻¹	226,6
pH	—	8,74
Sólidos suspensos totais	mg L ⁻¹	< LQ
Molibdênio (Mo)	mg L ⁻¹	0,06
Manganês (Mn)	mg L ⁻¹	0,69
Nitrogênio total	mg L ⁻¹	9,66

Nota: < L.Q = Menor que o Limite de Quantificação.

Fonte: Biotec Laboratório Agroindustrial Ltda. (2026).

2.2.7 Colheita

A colheita foi conduzida no ponto de maturação fisiológica (R9), identificado pelo amarelamento das folhas, pela secagem das vagens e pelo pleno desenvolvimento dos grãos. O procedimento foi realizado de forma manual, garantindo menor risco de danos mecânicos às vagens e preservando a integridade das estruturas reprodutivas destinadas às avaliações.

Para favorecer a uniformidade do processo e acelerar a dessecação da parte aérea, aplicou-se a solução dessecante composta pelo herbicida de contato Diquat, na dose de 1,5 L ha⁻¹. A pulverização foi realizada com bomba costal, utilizando volume de calda de 200 L ha⁻¹, seguindo as recomendações técnicas do equipamento. Após sete dias da aplicação, quando as plantas apresentavam completa secagem, procedeu-se à colheita manual.

Todas as vagens pertencentes à área útil de cada parcela foram coletadas e acondicionadas individualmente em sacos de ráfia, evitando misturas entre amostras (Figura 16A). Posteriormente, as vagens foram debulhadas manualmente, e os grãos passaram por peneiração para remoção de impurezas, assegurando sua integridade e a qualidade necessária para as etapas subsequentes das análises (Figuras 16B, 16C e 16D, respectivamente).

Figura 16. (A) Acondicionamento das vagens após colhidos; (B) Debulha das vagens; (C) Grãos debulhados e sujos; (D) Limpeza dos grãos.



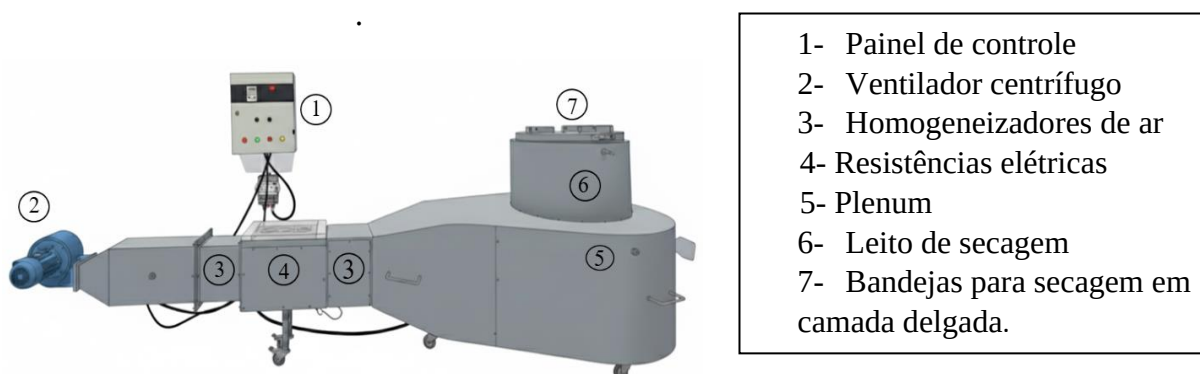
Fonte: Os autores (2026).

2.2.8 Secagem

A secagem dos grãos foi realizada em um secador experimental de camada fixa, equipado com sistema automatizado de controle de temperatura e fluxo de ar (Figura 17). O equipamento dispunha de resistências elétricas totalizando 12 kW de potência para o aquecimento do ar e utilizava um ventilador centrífugo tipo Siroco (modelo VSI-160, Ibram), acionado por motor de 1 cv e regulado por inversor de frequência.

A temperatura do ar de secagem foi mantida em 45 °C, monitorada por meio de termopar instalado na câmara de secagem, enquanto a velocidade média do ar foi ajustada para 1,2 m s⁻¹, medida com anemômetro digital de pás rotativas, da marca Instrutherm, modelo TAD 500.

Figura 17. Secador experimental de camada fixa utilizado na secagem dos grãos de feijão.



Fonte: Os autores (2026).

O controle operacional do sistema foi conduzido por um controlador universal de processos (Novus, modelo N1200), programado no modo Proporcional-Integral-Derivativo (PID), o que assegurou estabilidade térmica e precisão nas condições de operação. Durante o processo, os grãos foram revolvidos periodicamente para favorecer a uniformidade da frente de secagem, sendo o procedimento encerrado quando o teor de água atingiu aproximadamente 11 ± 0,3 % (base úmida), faixa adequada para armazenamento e preservação da qualidade tecnológica.

A determinação dos teores inicial e final de água dos grãos foi realizada pelo método da estufa de ventilação forçada, a 105 ± 1 °C, durante 24 h, conforme especificado nas Regras para Análise de Sementes (BRASIL, 2009), utilizando três repetições por tratamento.

2.2.9 Variáveis Analisadas

A avaliação das características agrônômicas foi realizada mediante a coleta de dez plantas representativas por parcela, desconsiderando-se as linhas de bordadura. Para as variáveis de crescimento, determinaram-se altura de planta, comprimento da raiz, além da massa fresca e massa seca da parte aérea e das raízes. As variáveis produtivas contemplaram o número de vagens por planta, número de sementes por vagem, peso de 100 grãos e produtividade, obtida a partir da massa total de grãos colhida por unidade de área.

A altura de planta foi obtida mediante mensuração do nível do solo até o ápice da haste principal utilizando régua graduada (Figura 18A). O comprimento radicular foi determinado

após a remoção do solo aderido, medindo-se a distância entre o ponto de inserção no caule e a extremidade da raiz (Figura 18B). As massas fresca e seca foram determinadas mediante separação da parte aérea e do sistema radicular, seguida de pesagem imediata (massa fresca) e posterior secagem em estufa de circulação de ar forçado, a temperatura de 65°C, até peso estabilizado (massa seca), conforme ilustrado pelas Figuras 24C e 24D, respectivamente.

Figura 18. A) Medição de altura de planta; (B) Medição de comprimento de raiz; (C) Pesagem da parte aérea das plantas; (D) Determinação da massa seca das plantas em estufa.



Fonte: Os autores (2026).

Os componentes de produção foram quantificados por contagem direta das estruturas: o número de vagens por planta foi obtido pelo total de vagens presentes em cada indivíduo; o número de sementes por vagem foi determinado após a abertura das estruturas e contagem das sementes internas. O peso de 100 grãos foi obtido pela pesagem de uma subamostra composta por 100 sementes previamente homogeneizadas. A produtividade foi estimada com base na

massa total de grãos obtida na área útil da parcela, corrigida para teor de água de 13% e expressa em kg ha⁻¹.

2.2.10 Análise Estatística

Os dados experimentais foram submetidos à análise de variância (ANOVA) a 5% de probabilidade, aplicando o teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade de erro, para comparação das médias, utilizando o Software SISVAR 5.8 (Ferreira, 2014).

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A água residuária de suinocultura apresentou condutividade elétrica de 16.424 µS cm⁻¹, equivalente a 16,42 dS m⁻¹, parâmetro relacionado à concentração de íons dissolvidos no efluente. Considerando a taxa acumulada de aplicação de 200 m³ ha⁻¹, foram adicionados ao solo 1,93 kg ha⁻¹ de nitrogênio total (N), 9,90 kg ha⁻¹ de fósforo (P) e 28,50 kg ha⁻¹ de potássio (K), macronutrientes primários de elevada importância para o crescimento, o desenvolvimento e a formação dos grãos do feijoeiro.

No que se refere às características agrônômicas do feijão-comum, houve efeito do tratamento apenas sobre a massa seca da parte aérea (MSPA), com significância a 1% de probabilidade pelo teste F (Tabela 4). Para altura de plantas, comprimento da raiz, massa fresca da parte aérea, massa fresca da raiz e massa seca da raiz, não foram constatadas diferenças significativas entre o cultivo com e sem aplicação de água residuária de suinocultura.

Tabela 4. Resumo da análise de variância e coeficientes de variação das características altura de planta (ALT), comprimento da raiz (CR), massa fresca da parte aérea (MFPA), massa fresca da raiz (MFR), massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca da raiz (MSR), submetidos ao tratamento com água residuária suína.

Fontes de variação	G.L.	ALT cm	CR cm	MFPA g planta ⁻¹	MFR g planta ⁻¹	MSPA g planta ⁻¹	MSR g planta ⁻¹
Bloco	2	50,66**	16,17*	10,79 ^{ns}	0,04 ^{ns}	0,54 ^{ns}	0,00 ^{ns}
Tratamento	1	12,04 ^{ns}	0,04 ^{ns}	18,37 ^{ns}	0,04 ^{ns}	9,37**	0,00 ^{ns}
Resíduo	20	5,53	2,37	38,55	0,04	1,42	0,00
Total	23	-	-	-			
CV (%)	—	5,57	8,57	17,47	21,3	17,79	0

G.L. Graus de Liberdade; *Significativo a 5% de probabilidade pelo teste de F; ** Significativo a 1% pelo teste de F; ^{ns} Não Significativo.

Fonte: Os autores (2026).

As plantas cultivadas com ARS apresentaram MSPA de 7,76 g planta⁻¹, enquanto aquelas sem aplicação alcançaram 6,53 g planta⁻¹, correspondendo a uma diferença de 1,23 g

planta⁻¹ (Tabela 5). Considerando que a altura das plantas não foi influenciada pelo tratamento, o aumento da MSPA pode estar associado a alterações na partição e no acúmulo de biomassa entre os órgãos da parte aérea, possivelmente relacionadas à expansão foliar, ao espessamento dos tecidos caulinares ou à maior emissão de ramificações.

Tabela 5. Efeitos do tratamento relacionado ao uso de água residuária suína: CA (com aplicação) e AS (ausência de aplicação) sobre a variável massa seca da parte aérea (MSPA).

Tratamento	MSPA (g/planta ⁻¹)
CA	7,76 a
AS	6,53 b
Média	7,15

Médias seguidas pela mesma letra minúscula, na coluna, não diferem estatisticamente entre si pelo teste *t* de Student, a 5% de probabilidade.

Fonte: Os autores (2026).

O maior acúmulo de matéria seca na parte aérea pode estar relacionado ao fornecimento adicional de nutrientes pela ARS e às alterações promovidas nas condições químicas do solo. Esse efluente pode adicionar matéria orgânica e elementos como nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e magnésio, aumentando sua disponibilidade para a absorção pelas plantas (Maciel *et al.*, 2024). Quando fornecidos em concentrações adequadas, esses nutrientes participam dos processos metabólicos e da formação de novos tecidos vegetativos, favorecendo o acúmulo de biomassa.

Santos (2025) encontrou resposta semelhante em feijão-comum cultivado com composto obtido de água residuária da suinocultura, registrando aumento da massa seca da parte aérea em determinados tratamentos. Embora o autor tenha utilizado o efluente na forma compostada, em associação com microrganismos promotores do crescimento, o resultado também indica que o aproveitamento dos nutrientes presentes nesse resíduo pode favorecer o crescimento vegetativo e o acúmulo de biomassa na parte aérea do feijoeiro.

Entre os componentes de produção avaliados, apenas o número de vagens por planta apresentou diferença significativa entre os tratamentos, a 5% de probabilidade pelo teste F (Tabela 6). Para o número de grãos por vagem, a massa de 100 grãos, a produtividade e o teor de água dos grãos, não foram observados efeitos significativos da aplicação de água residuária de suinocultura.

Tabela 6. Resumo da análise de variância e coeficientes de variação das características número de vagens por planta (NV), número de grãos por vagem (NGV), peso de 100 grãos (P100G), produtividade (PROD) e teor de água (TA).

Fontes de variação	G.L.	Quadrado médio				
		NV	NGV	P100G (g)	PROD (Kg ha ⁻¹)	TA (%)
Bloco	2	0,51 ^{ns}	0,33 [*]	8,74 ^{ns}	1,70 ^{**}	63,36 ^{**}
Tratamento	1	11,76 [*]	0,09 ^{ns}	14,42 ^{ns}	0,00 ^{ns}	6,68 ^{ns}
Resíduo	20	2,21	0,06	19,98 ^{ns}	0,25	6,40
Total	23	-	-	-	-	-
CV (%)	-	12,28	4,71	14	23,92	12,70

G.L. Graus de Liberdade; *Significativo a 5% de probabilidade pelo teste de F; ** Significativo a 1% pelo teste de F; ^{ns} Não Significativo.

Fonte: Os autores (2026).

A ausência de resposta para essas variáveis pode estar associada à fertilidade inicial do solo, possivelmente suficiente para fornecer grande parte dos nutrientes exigidos pela cultura. Nessas condições, o aporte adicional de nutrientes proveniente da água residuária pode não ter sido suficiente para promover alterações nos demais componentes de produção.

A aplicação de água residuária de suinocultura promoveu incremento no número de vagens por planta, com média de 12,81, em comparação às 11,41 vagens observadas na ausência de aplicação (Tabela 7). A diferença entre os tratamentos indica que o manejo com ARS favoreceu a formação de estruturas reprodutivas do feijoeiro nas condições experimentais adotadas.

Tabela 7. Influência da aplicação da água residuária suína: CA (com aplicação) e AS (ausência de aplicação) sobre a variável número de vagens por planta (NV).

Tratamento	NV
CA	12,81a
AS	11,41b
Média	12,11

Médias seguidas pela mesma letra minúscula, na coluna, não diferem estatisticamente entre si pelo teste *t* de Student, a 5% de probabilidade.

Fonte: Os autores (2026).

A resposta observada pode estar relacionada ao suprimento de fósforo durante a fase reprodutiva do feijoeiro. Esse nutriente participa do metabolismo energético da planta e fornece suporte aos processos envolvidos no florescimento e na formação das vagens. Assim, a disponibilidade de fósforo proveniente da ARS pode ter favorecido o estabelecimento de maior quantidade de estruturas reprodutivas, resultando no aumento do número de vagens por planta.

Suárez *et al.* (2023) constataram que o aumento do fornecimento de fósforo elevou significativamente o número de vagens em feijão-comum. A média passou de três vagens por planta, na ausência de adubação fosfatada, para quinze vagens por planta na maior dose avaliada, correspondente a 45 kg ha⁻¹ de P. Esse comportamento indica que a disponibilidade de fósforo pode influenciar a formação de vagens, principalmente durante o florescimento e o desenvolvimento inicial dessas estruturas.

2.4 CONCLUSÕES

A aplicação de água residuária de suinocultura promoveu maior acúmulo de massa seca na parte aérea do feijoeiro, assim como maior número de vagens por planta.

Para as demais variáveis de desempenho agrônomo do feijão-comum, cultivar TAA Dama, não foram observados efeitos estatisticamente significativos decorrentes da aplicação de água residuária de suinocultura.

2.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BISSANI, Carlos Alberto, Clesio Gianello, Flávio Anastácio de Oliveira Camargo, and Marino José Tedesco, **Fertilidade dos solos e manejo da adubação de culturas**, 2. ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. 344 p.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. **Registro Nacional de Cultivares: TAA Dama – *Phaseolus vulgaris* L.** Brasília, DF: MAPA, 2019. Acesso em: 24 jun. 2026.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. **Regras para análise de sementes.** Brasília, DF: MAPA/ACS, 2009. 399 p.
- CAMPOS, Anna Júlia de Moraes, Sarah Medeiros Santos, and Inaia Ravinem Freire Fagundes Nacarath, “Water stress in plants: a review,” **Research, Society and Development**, vol. 10, no. 15, p. e311101523155, 2021. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i15.23155>.
- CARVALHO, Maria da Conceição Santana de and Pedro Marques da Silveira, “Adubação,” in **Agência de Informação Tecnológica: Feijão**. Brasília, DF: Embrapa, 3 ago. 2023.
- CHERNICHARO, Carlos Augusto de Lemos, **Reatores anaeróbios**, 2. ed. rev., ampl. e atual. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2016. 379 p.
- CHRISTIANSEN, Jerald Emmet, **Irrigation by sprinkling**. Berkeley: California Agricultural Experiment Station, 1942. 124 p. (Bulletin, 670).
- COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO; AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, **Guia nacional de coleta e preservação de amostras: água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidos**. Organizadores: Carlos Jesus Brandão *et al.* São Paulo: CETESB; Brasília, DF: ANA, 2011. 326 p.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, **Calendário de plantio e colheita de grãos no Brasil 2022**. Brasília, DF: Conab, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br/aceso-a-informacao/institucional/publicacoes/arquivos-de-paginas/calendariozplantiozezcolheitazjunz2022.pdf>. Acesso em: 24 jun. 2026.

CRUZ, Maria do Céu Monteiro da *et al.*, “Swine wastewater application in the yellow passion fruit seedlings production,” **Revista Brasileira de Fruticultura**, vol. 30, no. 4, pp. 1107–1112, Dec. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-29452008000400043>.

DAL BOSCO, Tatiane C. *et al.*, “Swine wastewater application in soil cultivated with soybean: copper and zinc in the runoff material and in the soil,” **Engenharia Agrícola**, vol. 28, no. 4, pp. 699–709, Oct./Dec. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-69162008000400010>.

FERREIRA, Carlos Magri and José Alexandre Freitas Barrigossi, eds., **Arroz e feijão: tradição e segurança alimentar**. Brasília, DF: Embrapa; Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2021. 164 p.

FERREIRA, Daniel Furtado, “Sisvar: a guide for its bootstrap procedures in multiple comparisons,” **Ciência e Agrotecnologia**, vol. 38, no. 2, pp. 109–112, Mar./Apr. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-70542014000200001>.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA, **Banco de Dados Meteorológicos do INMET – BDMEP**. Brasília, DF: INMET, 2026. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br/>. Acesso em: 24 jun. 2026.

LEMOS, Raimundo Costa de and Raphael David dos Santos, **Manual de descrição e coleta de solo no campo**, 2. ed. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; Rio de Janeiro: Embrapa-SNLCS, 1984. 45 p.

LIMA, Allan Rodrigo Simão de *et al.*, “Corn productivity in different fertilization managements with swine wastewater,” **Brazilian Journal of Science**, vol. 2, no. 1, pp. 53–62, 2023. DOI: <https://doi.org/10.14295/bjs.v2i1.245>.

LINS, Leonardo Pereira, Janine Carvalho Padilha, Andréia Cristina Furtado, and Jessica Yuki de Lima Mito, “The energy use of biogas as a tool for the goals of sustainable development,” **Interações**, vol. 23, no. 4, pp. 1275–1286, Oct./Dec. 2022. DOI: <https://doi.org/10.20435/inter.v23i4.3704>.

MACIEL, Ana Paula Almeida Castaldelli *et al.*, “The impact of 9 years of swine wastewater application on the mineral and organic quality of soil in various agricultural crops,” **Water**, vol. 16, no. 10, art. 1412, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/w16101412>.

MANTOVANI, Everardo Chartuni, **Avalia: programa de avaliação da irrigação por aspersão e localizada**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2001.

MERRIAM, John L. and Jack Keller, **Farm irrigation system evaluation: a guide for management**. Logan: Utah State University, 1978. 271 p.

PIAIA, Fernando *et al.*, “Batch biodigesters efficiency in anaerobic biodigestion waste of swine,” **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, vol. 27, e10, 2023. DOI: <https://doi.org/10.5902/2236117085240>.

POSSE, Sheila Cristina Prucoli *et al.* (coord.), **Informações técnicas para o cultivo do feijoeiro-comum na região central-brasileira: 2009–2011**. Vitória, ES: Incaper, 2010. 245 p. (Incaper. Documentos, 191).

PRIOR, Maritane *et al.*, “Study of association between swine wastewater and chemical fertilizer in corn and soil,” **Engenharia Agrícola**, vol. 35, no. 4, pp. 744–755, Jul./Aug. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v35n4p744-755/2015>.

RAIJ, Bernardo van, Heitor Cantarella, José Antonio Quaggio, and Ângela Maria C. Furlani, eds., **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**, 2. ed. rev. atual. Campinas: Instituto Agrônômico; Fundação IAC, 1997. 285 p. (Boletim Técnico, 100).

RODRIGUES, Ludivina Lima, **Controle genético do escurecimento dos grãos de feijão com diferentes tipos de grão e origens**. 2018. 62 f. Dissertação (Mestrado em Genética e Melhoramento de Plantas) – Escola de Agronomia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2018.

SANTOS, Rafael Pedro dos, **Composto de água residuária da suinocultura e microrganismos promotores do crescimento vegetal para o desenvolvimento e produtividade do feijão comum**. 2025. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Agricultura e Ambiente) – Universidade Federal de Santa Maria, Frederico Westphalen, 2025.

SILVA, Jefferson Francisco do Amaral and Roberto Guimarães Pereira, “Overview of the global distribution and use of freshwater,” **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, vol. 10, no. 3, pp. 263–280, Apr./May 2019. DOI: <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2019.003.0023>.

SOARES, Khályta Willy da Silva *et al.*, “Shifting climate patterns in the Brazilian savanna evidenced by the Köppen classification and drought indices,” **Atmosphere**, vol. 16, no. 7, p. 849, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos16070849>.

SUÁREZ, Juan Carlos *et al.*, “Influence of increase in phosphorus supply on agronomic, phenological, and physiological performance of two common bean breeding lines grown in acidic soil under high temperature stress conditions,” **Plants**, vol. 12, no. 18, art. 3277, Sep. 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants12183277>.

3. CAPÍTULO II – CONSERVAÇÃO PÓS-COLHEITA DE GRÃOS DE FEIJÃO-COMUM: EFEITOS DA FERTIRRIGAÇÃO COM ÁGUA RESIDUÁRIA DE SUINOCULTURA E DO TIPO DE EMBALAGEM DURANTE O ARMAZENAMENTO

RESUMO

Na fase pós-colheita, os grãos de feijão-comum permanecem sujeitos a alterações que podem comprometer sua qualidade, sua aceitação pelo consumidor e seu valor comercial. A intensidade dessas alterações pode estar relacionada tanto às condições estabelecidas durante o cultivo quanto ao sistema de acondicionamento adotado no armazenamento. Diante do exposto, objetivou-se avaliar a qualidade de grãos de feijão-comum provenientes de plantas cultivadas com e sem aplicação de água residuária de suinocultura, acondicionados em diferentes tipos de embalagem ao longo do armazenamento. O experimento foi conduzido em Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC), em esquema fatorial $2 \times 3 \times 6$, com três repetições. Os tratamentos foram constituídos por duas condições de cultivo, com e sem aplicação de água residuária de suinocultura; três tipos de embalagem, garrafa de poli(tereftalato de etileno) (PET), polietileno e papel kraft com fechamento tipo *zip lock*; e seis períodos de armazenamento, correspondentes a 0, 36, 72, 108, 144 e 180 dias. Foram avaliadas as características de qualidade tecnológica, compreendendo o tempo de cocção, os teores de sólidos solúveis e totais, as porcentagens de embebição antes e após a cocção e o percentual de grãos inteiros; os parâmetros colorimétricos, representados pela luminosidade, pelo croma e pelo ângulo hue; e a qualidade nutricional, determinada pelos teores de proteína, lipídeos, cinzas e carboidratos. As análises indicaram que: a) o período de armazenamento influenciou todas as variáveis avaliadas; b) o tempo de cocção aumentou em ambas as condições de cultivo e nos três tipos de embalagem; c) aos 180 dias, os grãos acondicionados em polietileno apresentaram menor tempo de cocção que aqueles armazenados em garrafa PET e papel kraft; d) os grãos provenientes do cultivo com aplicação de água residuária de suinocultura apresentaram menor tempo de cocção a partir de 108 dias, maiores teores de sólidos solúveis e totais aos 72 e 108 dias e maior percentual de grãos inteiros aos 180 dias; e) o avanço do armazenamento reduziu a luminosidade e o ângulo hue e aumentou o croma, caracterizando o escurecimento e a intensificação da coloração dos grãos; f) os grãos produzidos sem aplicação do efluente apresentaram maior croma, enquanto o tipo de embalagem não alterou os parâmetros colorimétricos; g) os teores de proteína, lipídeos e carboidratos foram condicionados conjuntamente pela condição de cultivo, pelo tipo de embalagem e pelo período de armazenamento; e h) o teor de cinzas variou em função das interações entre embalagem e período de armazenamento e entre condição de cultivo e período de armazenamento. De modo geral, o período de armazenamento foi o principal fator associado às alterações observadas nos grãos. A embalagem de polietileno apresentou melhor desempenho na manutenção da qualidade de cocção ao final do armazenamento, enquanto a aplicação de água residuária de suinocultura contribuiu para menores tempos de cocção nos períodos mais avançados.

Palavras-chave: *Phaseolus vulgaris* L.; acondicionamento; composição centesimal; propriedades colorimétricas; qualidade tecnológica; biofertilizante.

ABSTRACT

During the postharvest period, common bean grains remain susceptible to changes that may compromise their quality, consumer acceptance, and commercial value. The extent of these changes may be associated with both the conditions established during crop production and the packaging system adopted during storage. Therefore, this study aimed to evaluate the quality of common bean grains obtained from plants grown with and without the application of swine wastewater and stored in different types of packaging. The experiment was conducted using a completely randomized design (CRD) in a $2 \times 3 \times 6$ factorial arrangement, with three replicates. The treatments consisted of two cultivation conditions, with and without swine wastewater application; three types of packaging, namely poly(ethylene terephthalate) (PET) bottles, polyethylene packaging, and kraft paper packaging with a zip-lock closure; and six storage periods: 0, 36, 72, 108, 144, and 180 days. Technological quality was assessed based on cooking time, soluble and total solids contents, water uptake before and after cooking, and the percentage of whole grains. Colorimetric parameters comprised lightness, chroma, and hue angle, whereas nutritional quality was determined based on protein, lipid, ash, and carbohydrate contents. The analyses indicated that: a) the storage period influenced all evaluated variables; b) cooking time increased under both cultivation conditions and in all types of packaging; c) after 180 days, grains stored in polyethylene packaging exhibited a shorter cooking time than those stored in PET bottles and kraft paper packaging; d) grains obtained from plants grown with swine wastewater application exhibited shorter cooking times from 108 days onward, higher soluble and total solids contents at 72 and 108 days, and a higher percentage of whole grains after 180 days; e) storage reduced lightness and hue angle and increased chroma, characterizing grain darkening and greater color intensity; f) grains produced without wastewater application exhibited higher chroma, whereas the type of packaging did not affect the colorimetric parameters; g) protein, lipid, and carbohydrate contents were jointly affected by cultivation condition, packaging type, and storage period; and h) ash content varied according to the interactions between packaging type and storage period and between cultivation condition and storage period. Overall, the storage period was the main factor associated with changes in grain quality. Polyethylene packaging showed better performance in maintaining cooking quality at the end of storage, whereas swine wastewater application contributed to shorter cooking times during the later storage periods.

Keywords: *Phaseolus vulgaris* L.; packaging; proximate composition; colorimetric properties; technological quality; biofertilizer

3.1 INTRODUÇÃO

O feijão-comum é uma das leguminosas mais cultivadas e consumidas no planeta, representando uma fonte essencial de proteínas, fibras, vitaminas e minerais, especialmente em países em desenvolvimento. No Brasil, sua importância transcende o valor nutricional, sendo um pilar da dieta e da cultura alimentar, além de desempenhar um papel socioeconômico significativo para milhões de agricultores. Contudo, a fase pós-colheita representa um gargalo crítico na cadeia produtiva, onde perdas substanciais de quantidade e, crucialmente, de qualidade podem comprometer a disponibilidade de alimentos, a rentabilidade dos produtores e a saúde dos consumidores (Kan *et al.*, 2018; Almeida *et al.*, 2020).

A manutenção da qualidade dos grãos de feijão-comum durante o armazenamento é um desafio complexo, influenciado por diversos fatores intrínsecos e extrínsecos. Grãos são sistemas biológicos vivos que começam a respirar e sofrem alterações metabólicas mesmo após a colheita. Durante o armazenamento, a qualidade pode ser degradada por processos fisiológicos, bioquímicos, microbiológicos e entomológicos (Neves; Savelli, 2017). Em regiões tropicais e subtropicais, caracterizadas por altas temperaturas e umidade relativa, esses processos são acelerados, tornando a conservação ainda mais desafiadora.

Um dos problemas mais relevantes e economicamente impactantes na conservação do feijão-comum é o endurecimento dos grãos durante o armazenamento. Esse processo, intensificado quando o produto é mantido sob condições inadequadas de temperatura e umidade, promove o aumento do tempo de cocção e a redução da maciez, comprometendo a aceitabilidade pelo consumidor, o valor comercial e, em alguns casos, a digestibilidade dos grãos (Paz, 2024).

Nesse cenário, a embalagem surge como uma ferramenta estratégica fundamental para mitigar as perdas pós-colheita e preservar a qualidade dos grãos. Ela atua como uma barreira física contra fatores ambientais adversos, como umidade, oxigênio, luz, e também contra pragas e microrganismos. Além disso, a embalagem pode modificar o microambiente interno, controlando a respiração dos grãos e o desenvolvimento de microrganismos por meio da criação de atmosferas modificadas ou herméticas (Silva, 2021).

A escolha da embalagem ideal é de suma importância e depende de fatores como custo, disponibilidade, condições climáticas, tempo de armazenamento e características físico-químicas e fisiológicas do grão (Matos; Silva, 2019). Diferentes materiais têm sido empregados, desde opções permeáveis, como sacos de rafia ou juta, até sistemas de maior barreira, como

filmes poliméricos multicamadas, embalagens a vácuo e atmosferas modificadas. Cada tipo apresenta limitações e potencialidades distintas quanto ao desempenho na conservação, impacto ambiental e adequação às demandas de mercado.

A aplicação de água residuária de suinocultura (ARS) pode alterar as propriedades físico-químicas dos grãos, como a capacidade de absorção de água e o tempo de cocção, impactando diretamente sua qualidade tecnológica. No entanto, a maioria dos estudos tem se concentrado na influência da ARS no solo e no cultivo. Este trabalho preenche uma lacuna importante na literatura ao investigar como a ARS pode afetar a qualidade dos grãos durante o armazenamento, uma área ainda pouco explorada.

Diante desse contexto, o presente estudo tem como objetivo avaliar a influência de diferentes tipos de embalagens e tratamentos na preservação das propriedades físico-químicas e tecnológicas dos grãos de feijão-comum ao longo do armazenamento. A investigação busca compreender como distintas barreiras e níveis de permeabilidade afetam a estabilidade do produto, permitindo identificar soluções mais eficientes para manter a qualidade do grão em condições reais de pós-colheita.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Obtenção dos grãos

Os grãos de feijão da cultivar TAA Dama, empregados neste estudo, foram provenientes de cultivo experimental conduzido na Fazenda Experimental de Ciências Agrárias (FAECA) da Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD), localizada no município de Dourados, Mato Grosso do Sul. Todas as etapas relacionadas ao cultivo, manejo, condução e colheita dos grãos estão descritas no Capítulo 1, itens 2.2.1 a 2.2.8, aos quais se remete para a apresentação completa dos procedimentos adotados.

3.2.2 Secagem dos grãos

Após a debulha e a remoção das impurezas, os grãos foram submetidos à secagem em secador experimental de camada fixa, empregando-se temperatura do ar de 45 °C e velocidade média de 1,2 m s⁻¹. Durante o processo, a massa de grãos foi revolvida periodicamente, sendo a operação encerrada quando o teor de água atingiu aproximadamente 11 ± 0,3%, em base úmida.

O teor de água foi determinado pelo método da estufa, a 105 ± 1 °C, durante 24 horas, utilizando-se três repetições por tratamento. Após a secagem, os grãos foram separados de

acordo com os tratamentos experimentais e acondicionados nas respectivas embalagens para o início do armazenamento.

3.2.3 Planejamento Experimental

O experimento foi conduzido em Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC), em esquema fatorial $2 \times 3 \times 6$, com três repetições. O arranjo experimental compreendeu duas condições de cultivo, com aplicação de água residuária de suinocultura (CA) e sem aplicação desse efluente (AS); três tipos de embalagem, correspondentes à garrafa de poli(tereftalato de etileno) (PET), à embalagem de polietileno e à embalagem do tipo zip lock de papel kraft; e seis períodos de armazenamento, estabelecidos em 0, 36, 72, 108, 144 e 180 dias. A combinação entre os tratamentos avaliou totalizou 108 unidades experimentais.

Após a colheita e a secagem, os grãos provenientes das condições de cultivo CA e AS foram mantidos separadamente. Uma amostra representativa dos grãos de cada condição foi imediatamente destinada às análises iniciais, correspondentes ao tempo 0, para a caracterização do material após a colheita. Os grãos remanescentes foram distribuídos entre os três tipos de embalagem, utilizando-se aproximadamente 120 g em cada unidade de acondicionamento, conforme apresentado na Figura 19.

Figura 19. Embalagens utilizadas para o acondicionamento dos grãos de feijão durante armazenamento em condições ambientais.



Fonte: Os autores (2026).

Os grãos acondicionados nos diferentes tipos de embalagens foram mantidos em condições ambientais de laboratório, no período de 24 de julho de 2025 a 24 de janeiro de 2026

(Figura 20). Durante o armazenamento, as amostras permaneceram em local limpo, seco, protegido da incidência direta de luz e afastado de fontes de calor e umidade.

Figura 20. Acondicionamento e disposição dos grãos de feijão comum, em diferentes embalagens durante o armazenamento em condições ambientais de laboratório.



Fonte: Os autores (2026).

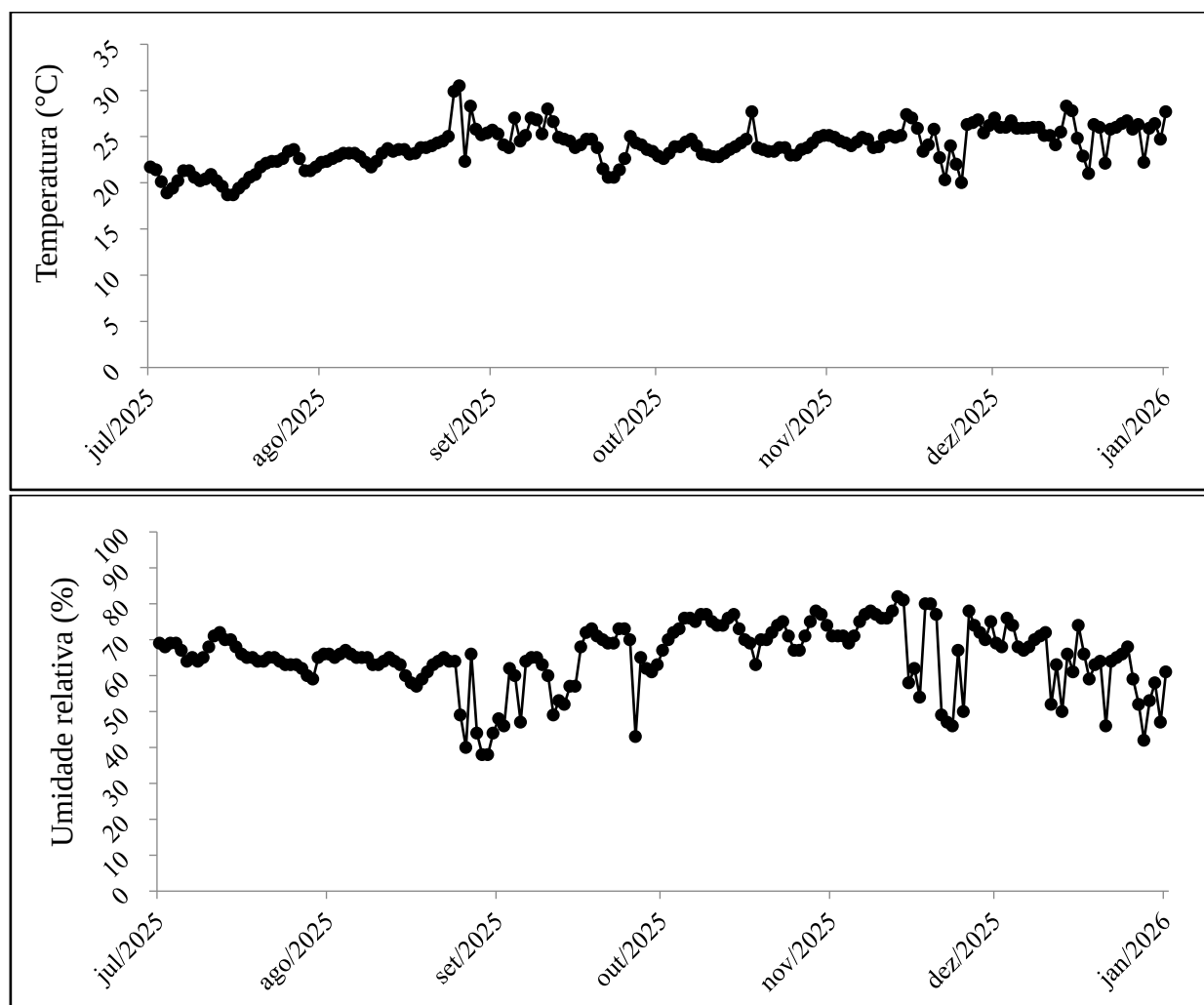
Em cada intervalo de avaliação, procedeu-se a retirada de três repetições de cada tipo de embalagem para a realização das análises previstas. Ao longo de todo o período experimental, a temperatura e a umidade relativa do ambiente foram monitoradas continuamente por meio de termo-higrômetro digital (Marca X-dronic, modelo HTC-1), assegurando a caracterização rigorosa das condições de armazenamento (Figuras 21 e 22).

Figura 21. Termo-higrômetro empregado no monitoramento da temperatura e da umidade relativa do ar no ambiente de armazenamento dos grãos de feijão.



Fonte: Os autores (2026).

Figura 22. Variação temporal da temperatura e da umidade relativa do ar no ambiente de armazenamento dos grãos de feijão-comum, entre julho de 2025 a janeiro de 2026.



Fonte: Os autores (2026).

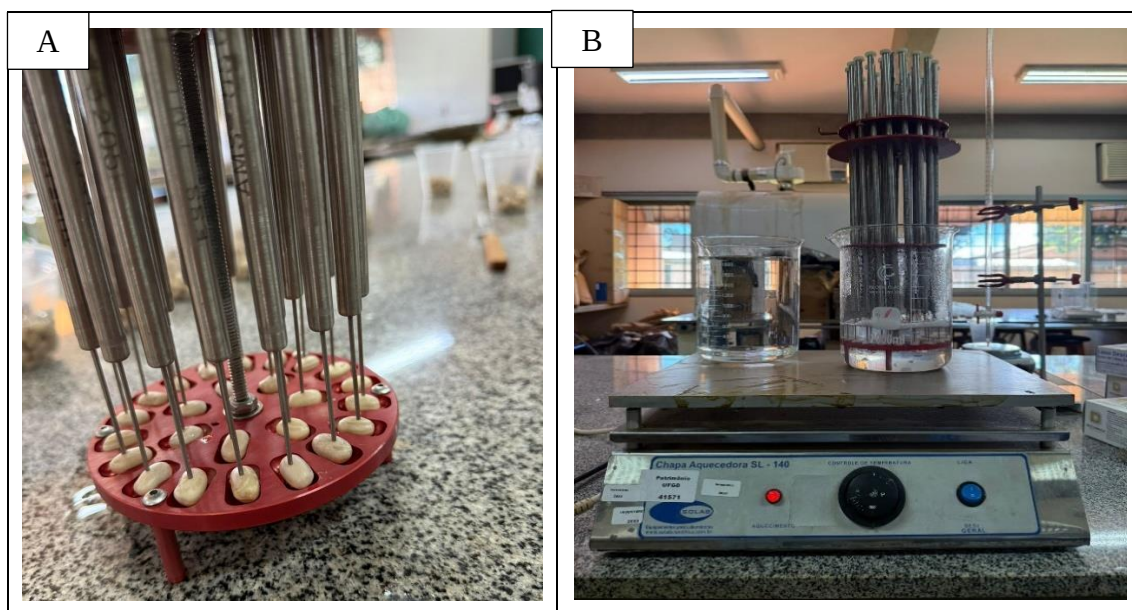
3.2.4 Variáveis Analisadas

3.2.4.1 Variáveis de Qualidade Tecnológica

O tempo de cozimento foi determinado segundo o método adaptado de Proctor e Watts (1987). Para cada repetição, aproximadamente 15 g de grãos foram pesados e submetidos à embebição em água destilada por 16 horas. Após a hidratação, selecionaram-se 25 grãos íntegros, que foram posicionados no Cozedor de Mattson (Figura 23A), composto por 25 hastes metálicas de 90 g com pontas de 2 mm.

O equipamento foi então inserido em um béquer contendo água destilada, aquecida até ebulição em chapa aquecedora elétrica modelo SL – 140 (Figura 23B). O tempo necessário para que 13 hastes atravessassem completamente os grãos foi registrado, sendo esse o critério adotado como ponto final do ensaio.

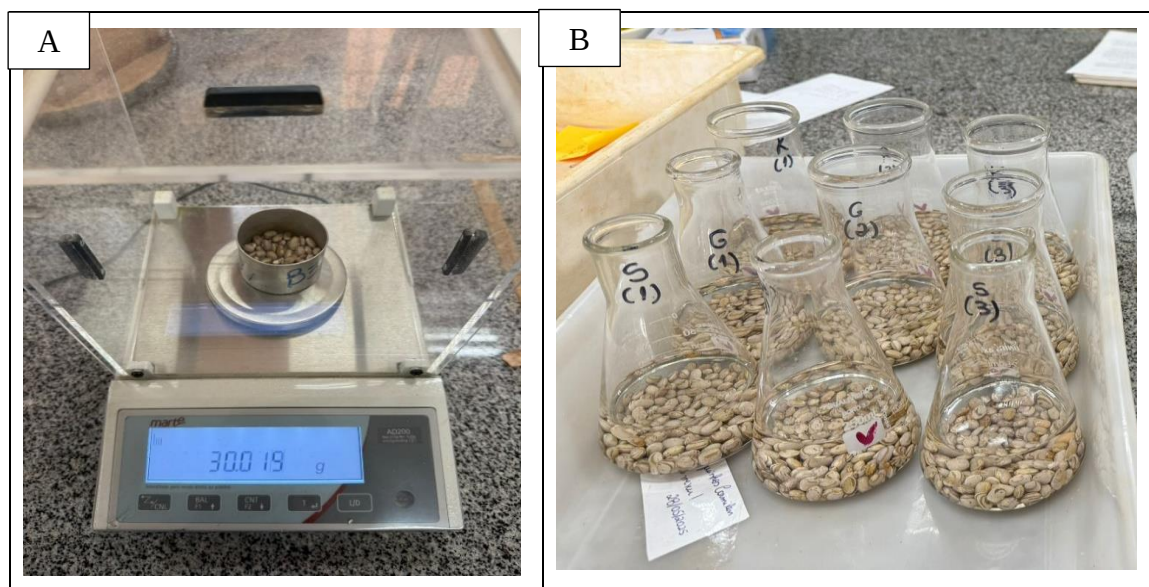
Figura 23. Procedimento experimental para determinação do tempo de cocção: (A) Posicionamento das hastes sobre os grãos; (B) condução do ensaio de cocção em banho-maria.



Fonte: Os autores (2026).

A porcentagem de embebição de água antes do cozimento (PEANC) foi determinada de acordo com a metodologia de Sartori (1982). Inicialmente foram amostradas aproximadamente 30 gramas de grãos uniformes e inteiras, conforme ilustrado na Figura 24A, obtendo-se assim, a massa seca (MS).

Figura 24. Etapas do procedimento para determinação da porcentagem de embebição de água antes do cozimento dos grãos de feijão-comum: (A) pesagem da amostra inicial, constituída por grãos uniformes e íntegros; (B) imersão dos grãos em água para hidrata



Fonte: Os autores (2026).

Posteriormente, os grãos foram colocados em béquer de 250 mL, com 100 mL de água destilada, por um período de 16 horas em temperatura ambiente (Figura 24B). Após esse período de embebição, os grãos foram rapidamente secos com papel toalha e pesados, obtendo-se a massa úmida (MU). A porcentagem de embebição foi determinada pela Equação 1, proposta por Garcia-Vela e Stanley (1989):

$$\%PEANC = \frac{MU-MS}{MS} * 100 \quad (1)$$

A porcentagem de embebição de água após o cozimento (PEAPC) foi determinada segundo Perina (2008). Os mesmos grãos empregados no teste de PEANC foram transferidos para béqueres de 250 mL contendo 100 mL de água destilada e submetidos a aquecimento sobre chapa aquecedora elétrica por 1 hora, com início de cronometragem a partir do estabelecimento da ebulição (Figura 25). Durante o processo, realizou-se a reposição do volume de água sempre que necessário, de modo a manter os grãos totalmente submersos. Após o tempo estabelecido, os grãos foram drenados e pesados, obtendo-se a massa úmida após o cozimento (MUc). A porcentagem de embebição foi então calculada pela Equação 2.

$$\%PEAPC = \frac{MUc-MS}{MS} * 100 \quad (2)$$

Figura 25. Aquecimento dos grãos sobre a chapa elétrica.



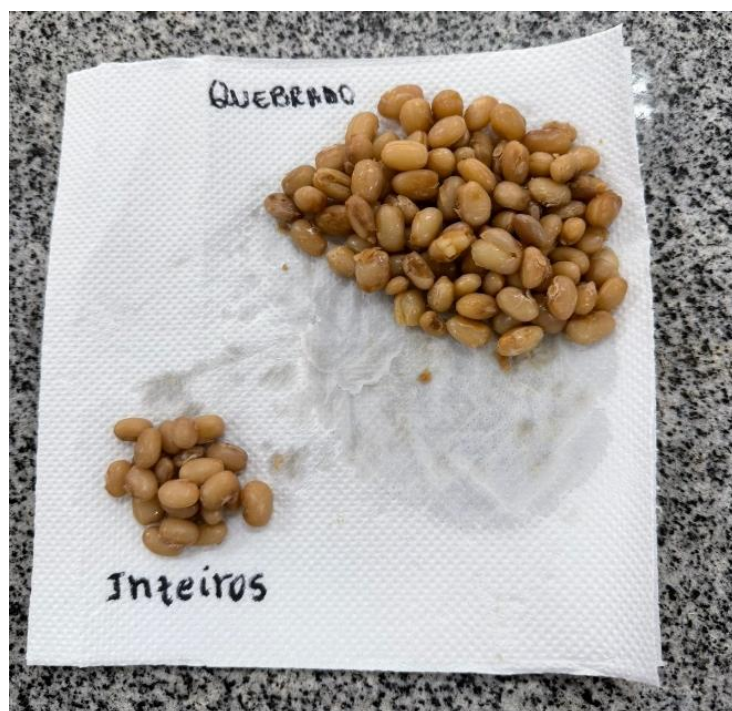
Fonte: Os autores (2026).

A quantificação da porcentagem de grãos inteiros (PGI) foi realizada com as mesmas amostras utilizadas para a determinação da PEAPC. Após o cozimento os grãos foram pesados em sua totalidade (TG) e separados em duas porções: inteiros (GI), quando apresentavam o cotilédone em sua totalidade, e partidos (GP) quando o cotilédone ficava exposto e desgasto

(Figura 26). A seguir, quantificou-se, a porcentagem de grãos inteiros, determinado pela Equação 3 (Garcia-Vela; Stanley, 1989):

$$\%PGI = \frac{TG-GP}{TG} * 100 \quad (3)$$

Figura 26. Separação dos grãos inteiros e quebrados.



Fonte: Os autores (2026).

A determinação dos sólidos solúveis totais presentes no caldo (SST) foi conduzida a partir do material obtido no teste de PEAPC. Após o cozimento, os grãos foram separados do caldo, do qual se retirou uma amostra de 10 g (MS). Em seguida, o volume destinado à análise foi transferido para cadinhos previamente tarados e submetido à secagem em estufa de circulação forçada a 60 °C por 24 h (Figura 27). Após a secagem, os cadinhos foram novamente pesados, e o teor de sólidos solúveis totais foi determinado pela Equação 4, com base na diferença entre as massas inicial e final.

$$\%SST = \frac{\text{massa do resíduo} * 100}{MS} \quad (4)$$

Em que:

%SST = teor de sólidos solúveis totais, expresso em porcentagem (%);

Massa do resíduo = massa do material remanescente após o procedimento de secagem ou evaporação, expressa em gramas (g);

MS = massa da amostra utilizada na determinação, expressa em gramas (g).

Figura 27. (A) Separação do caldo; (B) Caldo submetido à secagem em estufa.



Fonte: Os autores (2026).

O teor de sólidos solúveis (°Brix) foi determinado a partir do caldo obtido no cozimento do teste de PEAPC, utilizando um refratômetro digital portátil modelo RTD-95. Para cada repetição, uma gota do caldo foi aplicada diretamente no leitor do equipamento, previamente higienizado com água destilada entre as medições, assegurando a precisão das leituras (Figura 28).

Figura 28. Leitura do Brix no refratômetro digital.



Fonte: Os autores (2026).

A coloração do tegumento dos grãos foi avaliada utilizando um colorímetro manual Minolta® CR-410, equipado com abertura de leitura de 50mm. As amostras foram distribuídas

em placas de Petri de vidro até próximo ao preenchimento total do volume, garantindo superfície homogênea para leitura. O sensor do equipamento foi posicionado perpendicularmente à superfície dos grãos, permitindo a incidência direta do feixe de luz, conforme ilustrado na Figura 29. Para cada amostra, realizaram-se três aferições consecutivas.

Figura 29. Determinação da coloração dos grãos com o auxílio de um colorímetro.



Fonte: Os autores (2026).

As medições foram obtidas no sistema CIELab (CIE 1976), no qual L^* expressa a luminosidade (0–100), a^* varia do verde (–60) ao vermelho (+60) e b^* do azul (–60) ao amarelo (+60), conforme descrito por Francis (1988). Os resultados são apresentados em unidades de medida (u.m.) correspondentes a cada parâmetro.

Com os dados obtidos, calculou-se a Cromaticidade (C^*) e o ângulo de coloração (H^*) por meio das equações a seguir (Ferreira; Spricigo, 2017):

$$C^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \quad (5)$$

$$H^* = \tan^{-1} = \left(\frac{b^*}{a^*}\right) \quad (6)$$

Em que:

H = ângulo de coloração ou tonalidade cromática (°);

a^* = componente de cor verde – vermelho;

b^* = componente de cor azul - amarelo;

C^* = cromaticidade.

3.2.5 Análise Estatística

O experimento foi conduzido em Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC), em esquema fatorial $2 \times 3 \times 6$, constituído por duas condições de cultivo, três tipos de embalagem e seis períodos de armazenamento, conforme descrito no item 3.2.3, com três repetições.

Inicialmente, os dados foram submetidos à verificação dos pressupostos da análise de variância (ANOVA). A normalidade dos resíduos foi avaliada pelo teste de Shapiro-Wilk, enquanto a homogeneidade das variâncias foi verificada pelo teste de Bartlett. Atendidos os pressupostos, os dados foram submetidos à análise de variância pelo teste F, a 5% de probabilidade.

Quando constatado efeito significativo das interações entre os fatores, procedeu-se ao respectivo desdobramento, avaliando-se os efeitos simples de cada fator dentro dos níveis dos demais fatores envolvidos. Para os fatores qualitativos, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

O efeito do período de armazenamento, considerado fator quantitativo, foi avaliado por meio de análise de regressão. A escolha do modelo foi realizada com base na significância dos coeficientes de regressão pelo teste t de Student, a 5% de probabilidade, no coeficiente de determinação e na adequação do modelo ao comportamento biológico da variável analisada.

As análises estatísticas foram realizadas nos programas SISVAR, versão 5.8, e R, enquanto o ambiente R também foi empregado na elaboração das representações gráficas (Ferreira, 2014; R Core Team, 2026).

3.3 Análise Multivariada

Foi realizada a análise de correlação linear de Pearson foi aplicada às variáveis de interesse no nível de 5% de significância. A análise de estatística multivariada de componentes principais (ACP) foi aplicada a todas as variáveis resposta, relativas à qualidade tecnológica e de cor do feijão. A análise de ACP foi utilizada para interpretar as relações entre as variáveis de qualidade e tempos de armazenamento, aplicando-se a análise ao conjunto completo de variáveis respostas, visando explorar a estrutura multivariada dos dados e a relação global entre os parâmetros estudados.

Os componentes principais foram extraídos da matriz de correlação das variáveis originais. Também foi empregada a modelagem preditiva através da análise supervisionada de discriminante PLS-DA (*Partial Least Squares Discriminant Analysis*), com o objetivo de separação dos fatores tratamentos empregados no campo (com e sem o uso de água residuária

na produção do feijão) e do fator tipos de embalagem empregadas durante o armazenamento. O resultado foi apresentado utilizando-se as elipses de confiança (99%) e os gráficos dos t-componente assim como os scores VIP (*Variable importance in projection*). As análises foram geradas Excel® utilizando-se o suplemento XLSTAT.

3.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.4.1 Qualidade tecnológica e características colorimétricas dos grãos

De acordo com a análise de variância, a interação entre o tipo de embalagem e o período de armazenamento (TE × T) foi significativa apenas para o tempo de cocção, a 5% de probabilidade pelo teste F. A interação entre o tratamento e o período de armazenamento (TRAT × T) foi significativa para o tempo de cocção, a 5%, e para o teor de sólidos solúveis, sólidos totais, embebição após a cocção e percentual de grãos inteiros, a 1%. As interações entre o tipo de embalagem e o tratamento (TE × TRAT) e entre os três fatores (TE × TRAT × T) não foram significativas para nenhuma das variáveis analisadas (Tabela 8).

Tabela 8. Resumo da análise de variância (quadrado médio) do tempo de cocção (COC), teor de sólidos solúveis (BRIX), sólidos totais (ST), porcentagem de embebição antes da cocção (PEANC), porcentagem de embebição após a cocção (PEAPC) e percentual de grãos inteiros (PGI), em função do tipo de embalagem (TE), tratamentos (TRAT) e tempo (T).

Fontes de Variação	G.L.	Quadrado Médio					
		COC (Min)	BRIX	ST	PEANC (%)	PEAPC	PGI
Tipo de Embalagem (TE)	2	2,928 ^{ns}	0,308 ^{ns}	1,266 ^{ns}	22,164 ^{ns}	107,924 ^{ns}	22,126 ^{ns}
Tratamento (TRAT)	1	34,964 ^{**}	9,810 ^{**}	15,323 ^{**}	65,770 ^{ns}	2,862 ^{ns}	78,848 [*]
Tempo (T)	5	170,029 ^{**}	2,442 ^{**}	8,759 ^{**}	283,261 ^{**}	4051,728 ^{**}	168,568 ^{**}
TE*TRAT	2	0,871 ^{ns}	0,227 ^{ns}	0,032 ^{ns}	0,023 ^{ns}	164,448 ^{ns}	0,533 ^{ns}
TE*T	10	3,530 [*]	0,615 ^{ns}	0,242 ^{ns}	12,875 ^{ns}	65,709 ^{ns}	6,177 ^{ns}
TRAT*T	5	4,630 [*]	4,254 ^{**}	5,021 ^{**}	59,900 ^{ns}	502,298 ^{**}	76,424 ^{**}
TE*TRAT*T	10	2,896 ^{ns}	0,126 ^{ns}	0,297 ^{ns}	31,285 ^{ns}	34,161 ^{ns}	7,665 ^{ns}
Resíduo	72	1,67	0,37	0,59	29,82	85,65	15,58
CV (%)	-	6,39	14,64	17,66	4,84	5,29	19,15

G.L. Graus de Liberdade; *Significativo a 5% de probabilidade pelo teste F; ** Significativo a 1% pelo teste de F; ^{ns} Não Significativo.

Fonte: Os autores (2026).

Quanto à precisão experimental, pode-se verificar que os valores dos coeficientes de variação do tempo de cocção, da porcentagem de embebição antes da cocção e da porcentagem de embebição após a cocção foram classificados como baixos, por serem inferiores a 10%. Já os coeficientes de variação do teor de sólidos solúveis, dos sólidos totais e do percentual de

grãos inteiros foram classificados como médios, por apresentarem valores entre 10 e 20%, conforme os critérios de Pimentel-Gomes (2009).

Observa-se, na Tabela 9, que o tempo de cocção aumentou ao longo do armazenamento, considerando-se o valor inicial de 16,35 min. Até os 144 dias, não foram verificadas diferenças significativas entre os tipos de embalagem. Aos 180 dias, entretanto, os grãos acondicionados em embalagem de polietileno apresentaram menor tempo de cocção (21,93 min) em comparação àqueles armazenados em garrafa PET (24,10 min) e em embalagem kraft (25,03 min), que não diferiram estatisticamente entre si.

Tabela 9. Valores médios de tempo de cocção (COC) em função dos tipos de embalagem ao longo de 6 meses de armazenamento.

Tipo de embalagem	Tempo de armazenamento (Dias)						Médias
	0	36	72	108	144	180	
Garrafa	16,35aA	17,69aAB	18,8aB	21,54aC	23,07aCD	24,10bD	20,26
Kraft	16,35aA	17,31aAB	18,96aB	21,49aC	23,81aCD	25,03bD	20,49
Polietileno	16,35aA	17,77aAB	19,43aBC	20,22 aCD	23,83aDE	21,93aDE	19,92
Médias	16,35	17,59	19,06	21,08	23,57	23,69	20,22

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Fonte: Os Autores (2026).

Esse comportamento pode estar associado ao fenômeno *hard-to-cook* (HTC), caracterizado pela maior resistência dos grãos ao amolecimento durante a cocção. Segundo Khan *et al.* (2026), o desenvolvimento desse defeito apresenta natureza multifatorial e pode envolver alterações nas paredes celulares, interações entre pectinas e minerais, participação de compostos fenólicos, deterioração das membranas e modificações nas proteínas e no amido. Em conjunto, essas alterações dificultam a separação das células dos cotilédones durante a cocção e prolongam o tempo necessário para o amolecimento dos grãos.

De acordo com Wainaina *et al.* (2021), entre os principais fatores associados ao desenvolvimento desse defeito estão o armazenamento prolongado sob temperaturas superiores a 25 °C e umidade relativa acima de 65%. Conforme apresentado na Figura 28, no ambiente em que os grãos permaneceram armazenados, a temperatura variou aproximadamente entre 19 e 31 °C e a umidade relativa entre 40 e 82%, com registros frequentes acima desses limites.

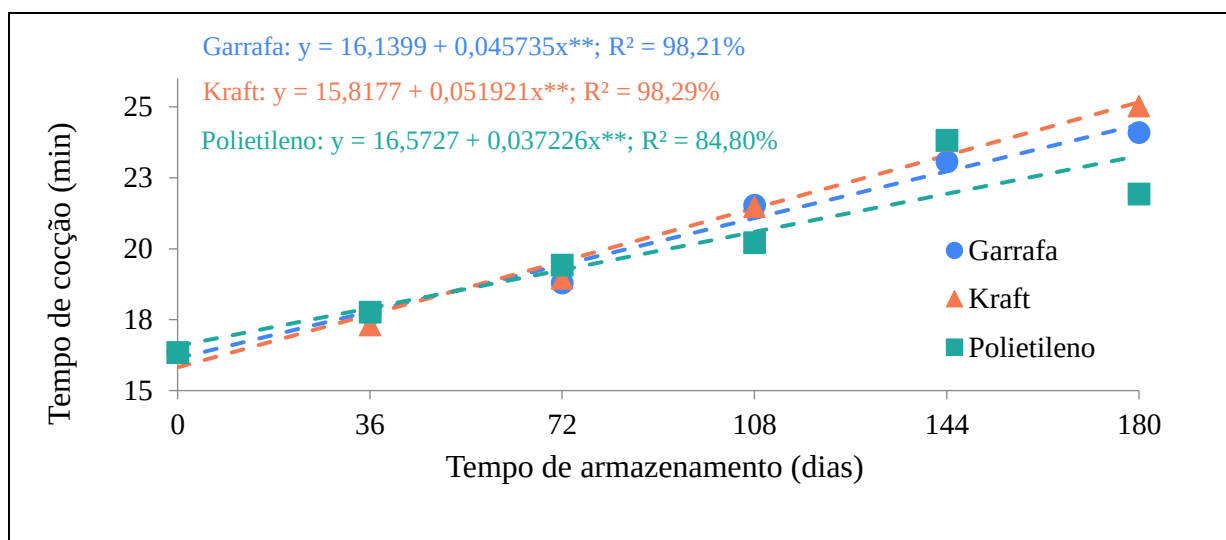
A exposição dos grãos a essas condições de armazenamento pode ter favorecido alterações estruturais no tegumento e nos cotilédones, reduzindo a absorção de água e dificultando o amolecimento durante a cocção (Njoroge *et al.*, 2016; Toili *et al.*, 2022). Nguyen

et al. (2026) acrescentam que as associações entre cálcio e pectina, juntamente com aquelas relacionadas aos compostos fenólicos, aumentam a resistência das paredes celulares e limitam a separação das células durante o cozimento.

Resultados semelhantes foram encontrados por Abay e Tolesa (2023), que avaliaram o efeito de diferentes condições de temperatura e umidade relativa sobre o tempo de cocção de cultivares de feijão-comum. Os autores adotaram 25 °C e 65% de umidade relativa como condição de referência e verificaram que, nas combinações superiores a esses valores, houve aumento significativo do tempo de cocção dos grãos.

O tempo de cocção aumentou linearmente ao longo do armazenamento em todas as embalagens (Figura 30). Com base nos coeficientes angulares das equações de regressão, ao final de 180 dias foram estimados acréscimos de 9,35 min para a embalagem kraft, 8,23 min para a garrafa PET e 6,70 min para o polietileno. Os coeficientes de determinação variaram de 84,80 a 98,29%, indicando bom ajuste dos modelos aos dados.

Figura 30. Ajuste de regressão linear do tempo de cocção dos grãos de feijão-comum acondicionados em garrafa PET, embalagem kraft e embalagem de polietileno, em função do período de armazenamento.



Fonte: Os Autores (2026).

O menor acréscimo no tempo de cocção dos grãos acondicionados em embalagem de polietileno pode estar relacionado à capacidade desse material de reduzir as trocas de vapor de água com o ambiente, promovendo maior estabilidade do teor de água dos grãos e retardando seu endurecimento. Lima, Tomé e Abreu (2014), ao avaliarem feijões armazenados por oito meses, também observaram menor tempo de cocção em embalagens de polietileno de 80 µm, seladas com ou sem vácuo, em comparação à embalagem comercial de menor espessura.

Observa-se, na Tabela 10, que as características tecnológicas dos grãos de feijão variaram em função do tratamento e do período de armazenamento. O tempo de cocção aumentou ao longo dos 180 dias em ambos os tratamentos, enquanto as demais variáveis apresentaram respostas específicas em cada período avaliado.

Tabela 10. Valores médios de tempo de cocção (COC), sólidos solúveis (BRIX), sólidos totais (ST), porcentagem de embebição após o cozimento (PEAPC) e percentual de grãos inteiros (PGI) dos grãos de feijão provenientes dos tratamentos CA (plantas cultivadas com aplicação de água residuária suína) e AS (plantas cultivadas sem aplicação de água residuária suína), avaliados ao longo de 180 dias de armazenamento.

Tratamento	Tempo de armazenamento (dias)						Médias
	0	36	72	108	144	180	
Tempo de cocção (min)							
CA	16,03 aA	17,29 aA	19,21 aB	19,90 aB	22,51 aC	22,97 aC	19,65
AS	16,66 aA	17,89 aAB	18,91 aB	22,26 bC	24,63 bD	24,40 bD	20,79
Médias	16,35	17,59	19,06	21,08	23,57	23,69	20,22
Sólidos solúveis (BRIX)							
CA	4,05 aA	4,37 aA	5,54 bB	5,41 bB	3,62 aA	3,83 aA	4,47
AS	3,94 aA	3,98 aA	3,67 aA	3,69 aA	3,61 aA	4,33 aA	3,87
Médias	4,00	4,17	4,61	4,55	3,62	4,08	4,17
Sólidos totais (ST)							
CA	4,01 aA	4,25 aA	5,88 bB	6,48 bB	3,77 aA	3,94 aA	4,72
AS	3,82 aAB	4,05 aAB	3,61 aAB	4,61 aB	3,42 aA	4,31 aAB	3,97
Médias	3,92	4,15	4,74	5,55	3,59	4,13	4,35
Embebição após a cocção – PEAPC (%)							
CA	172,06 aB	158,90 aA	206,06 bC	163,92 aAB	173,51 aB	174,57 aB	174,84
AS	172,57 aBC	150,92 aA	191,20 aD	165,12 aB	186,83 bD	184,33 bCD	175,16
Médias	172,32	154,91	198,63	164,52	180,17	179,45	175,00
Percentual de grãos inteiros – PGI (%)							
CA	24,32 aC	14,61 aA	13,96 aA	18,04 aAB	22,82 aBC	24,79 bC	19,76
AS	24,67 aA	21,59 bA	19,70 bA	19,83 aA	22,34 aA	20,65 aA	21,46
Médias	24,50	18,10	16,83	18,94	22,58	22,72	20,61

Médias seguidas pela mesma letra minúscula, na linha, não diferem entre os tratamentos; médias seguidas pela mesma letra maiúscula, na coluna, não diferem entre os tempos, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Fonte: Os autores (2026).

O tratamento influenciou significativamente o tempo de cocção somente a partir de 108 dias de armazenamento, quando se tornaram mais evidentes os efeitos do envelhecimento, processo natural e contínuo ao qual os grãos estão sujeitos durante a armazenagem. Com o

avanço desse processo, ocorre aumento progressivo da resistência à cocção e da dureza dos grãos, dificultando o amolecimento dos cotilédones e reduzindo a maciez após o preparo (Coelho *et al.*, 2009; Bento *et al.*, 2021a). Aos 180 dias, os grãos provenientes do cultivo sem aplicação de água residuária de suinocultura (AS) apresentaram tempo de cocção de 24,40 minutos, valor 6,2% superior aos 22,97 minutos registrados nos grãos produzidos com aplicação do efluente (CA), ocorrendo diferença estatística entre as médias ao nível de 5%.

Esse comportamento pode estar associado às condições nutricionais estabelecidas durante o desenvolvimento e o enchimento dos grãos. A aplicação de água residuária de suinocultura pode ter modificado a disponibilidade de nutrientes às plantas e, consequentemente, a composição das reservas e a fração mineral acumuladas nos cotilédones.

Segundo Kigel (1999), as características apresentadas pelos grãos no momento da colheita são determinadas, além do genótipo, pelas condições ambientais e edáficas atuantes durante o crescimento das plantas e o desenvolvimento das sementes, as quais podem influenciar os teores de proteínas, amido, açúcares e minerais, bem como a dureza, a absorção de água e o comportamento durante a cocção.

Os teores de sólidos solúveis (Brix) e totais (ST) no caldo do feijão diferiram entre os tratamentos apenas aos 72 e 108 dias de armazenamento, com maiores valores nos grãos provenientes do cultivo CA. Esse comportamento pode estar associado à maior transferência de constituintes dos cotilédones para o caldo durante a cocção. Aos 72 dias, essa resposta coincidiu com a menor porcentagem de grãos inteiros, indicando que o rompimento dos grãos favoreceu a exposição dos tecidos internos e a liberação de sólidos.

Perina *et al.* (2010) também relacionaram o aumento de Brix no caldo à menor porcentagem de grãos inteiros, enquanto Zia-ur-Rehman *et al.* (2003) observaram que a ruptura celular intensificou a lixiviação dos constituintes dos grãos e elevou o teor de ST.

O percentual de embebição após a cocção diferiu entre os tratamentos aos 72, 144 e 180 dias de armazenamento. Aos 72 dias, os grãos do cultivo com aplicação de água residuária (CA) apresentaram maior embebição (206,06%), enquanto, aos 144 e 180 dias, os maiores valores ocorreram sem aplicação do efluente, com 186,83 e 184,33%, respectivamente.

Essa inversão pode decorrer de diferenças na composição e na organização dos tecidos formadas durante o cultivo, que inicialmente favoreceram a retenção de água nos grãos produzidos com o efluente. Com o avanço do armazenamento, alterações nas membranas e

paredes celulares podem ter se intensificado nos grãos produzidos sem aplicação, superando o efeito inicial do tratamento (Leal *et al.*, 2021; Cavalcante *et al.*, 2024).

O percentual de grãos inteiros (PGI) apresentou comportamento distinto entre os tratamentos ao longo do armazenamento. Aos 36 e 72 dias, os maiores valores foram registrados nos grãos produzidos sem aplicação de água residuária (AS), enquanto, aos 180 dias, a superioridade ocorreu no tratamento com aplicação do efluente (CA).

Aos 72 dias, o menor percentual de grãos inteiros coincidiu com a maior embebição após a cocção, condição que pode ter intensificado a expansão dos tecidos e melhorando a suscetibilidade dos grãos ao rompimento. Oliveira (2024) também verificou associação negativa entre essas características, relacionando o aumento da embebição à menor integridade física dos grãos.

Para analisar o efeito do período de armazenamento sobre o tempo de cocção, os teores de sólidos solúveis e totais, o percentual de embebição após a cocção e o percentual de grãos inteiros, foram realizadas análises de regressão para cada tratamento, conforme apresentado na Tabela 11.

Tabela 11. Equações de regressão ajustadas para tempo de cocção, sólidos solúveis, sólidos totais, porcentagem de embebição após o cozimento e percentual de grãos inteiros de feijão provenientes de plantas cultivadas com aplicação de água residuária de suinocultura (AS), em função do tempo de armazenamento.

Tempo de cocção (min)		
Tratamentos	Equação de regressão ajustada	R ² (%)
CA	$y = 16,0078 + 0,0405x^{**}$	97,63
AS	$y = 16,8419 - 0,0230xns + 0,001145x^{2**} - 0,00000434x^{3**}$	98,57
Sólidos solúveis (%)		
Tratamentos	Equação de regressão ajustada	R ² (%)
CA	$y = 3,9827 + 0,0279x^{**} - 0,000171x^{2**}$	59,60
AS	$y = 4,0627 - 0,0100x^{*} + 0,000060x^{2*}$	63,41
Sólidos totais (%)		
Tratamentos	Equação de regressão ajustada	R ² (%)
CA	$y = 3,7570 + 0,0429x^{**} - 0,000244x^{2**}$	56,15
AS	Sem ajuste significativo	
Porcentagem de embebição após o cozimento (%)		
Tratamentos	Equação de regressão ajustada	R ² (%)
CA	$y = 169,1095 + 0,2076x^{**} - 0,001091x^{2**}$	5,71
AS	$y = 168,8590 - 0,2525xns + 0,005021x^{2*} - 0,00001750x^{3*}$	28,18

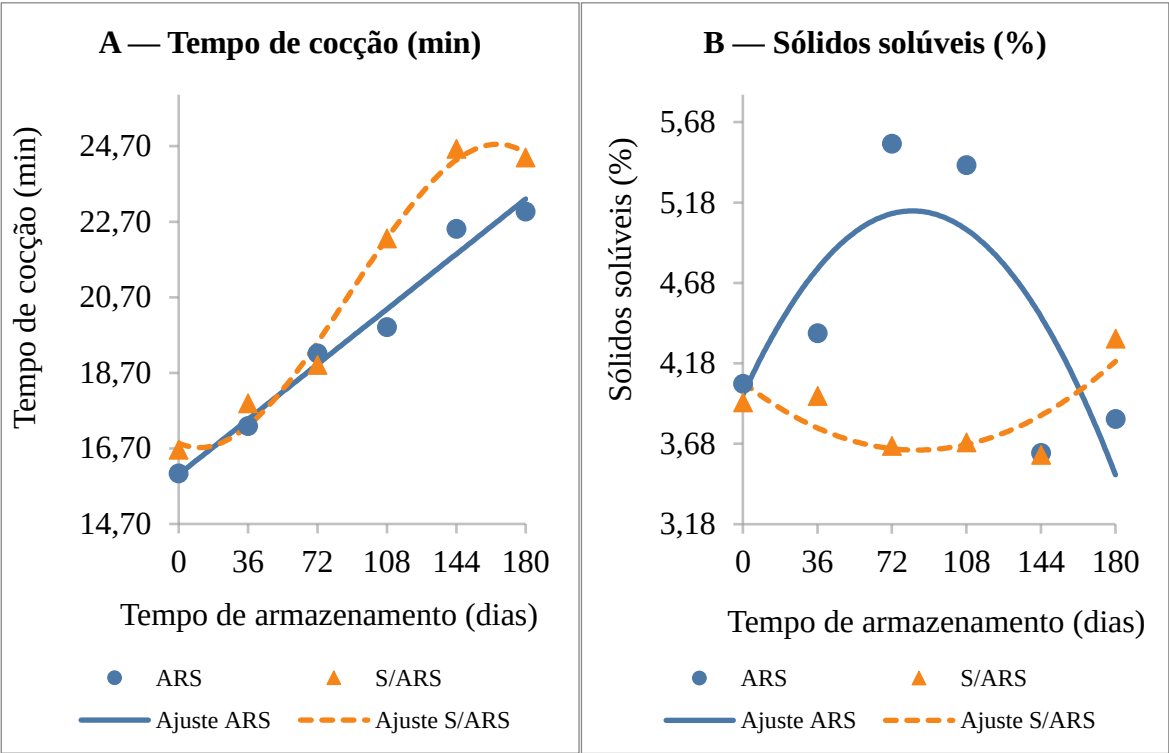
Percentual de grãos inteiros (%)		
Tratamentos	Equação de regressão ajustada	R ² (%)
CA	$y = 24,2914 - 0,4259x^{**} + 0,004933x^{2**} - 0,00001418x^{3**}$	99,98
AS	$y = 24,1894 - 0,0749x^{*} + 0,000338x^{2*}$	66,62

*Coeficientes significativos ao nível de 5% e ** ao nível de 1% de significância de pelo teste t-Student; ns: não significativo.

Fonte: Os autores (2026).

No que se refere ao tempo de cocção, observou-se aumento linear ao longo do armazenamento nos grãos provenientes do cultivo com aplicação de água residuária. Na ausência do efluente, a variação foi descrita por modelo cúbico, com elevação mais pronunciada após 72 dias e menor amplitude de alteração nos períodos finais, caracterizando respostas distintas dos tratamentos ao avanço do armazenamento (Figura 31A).

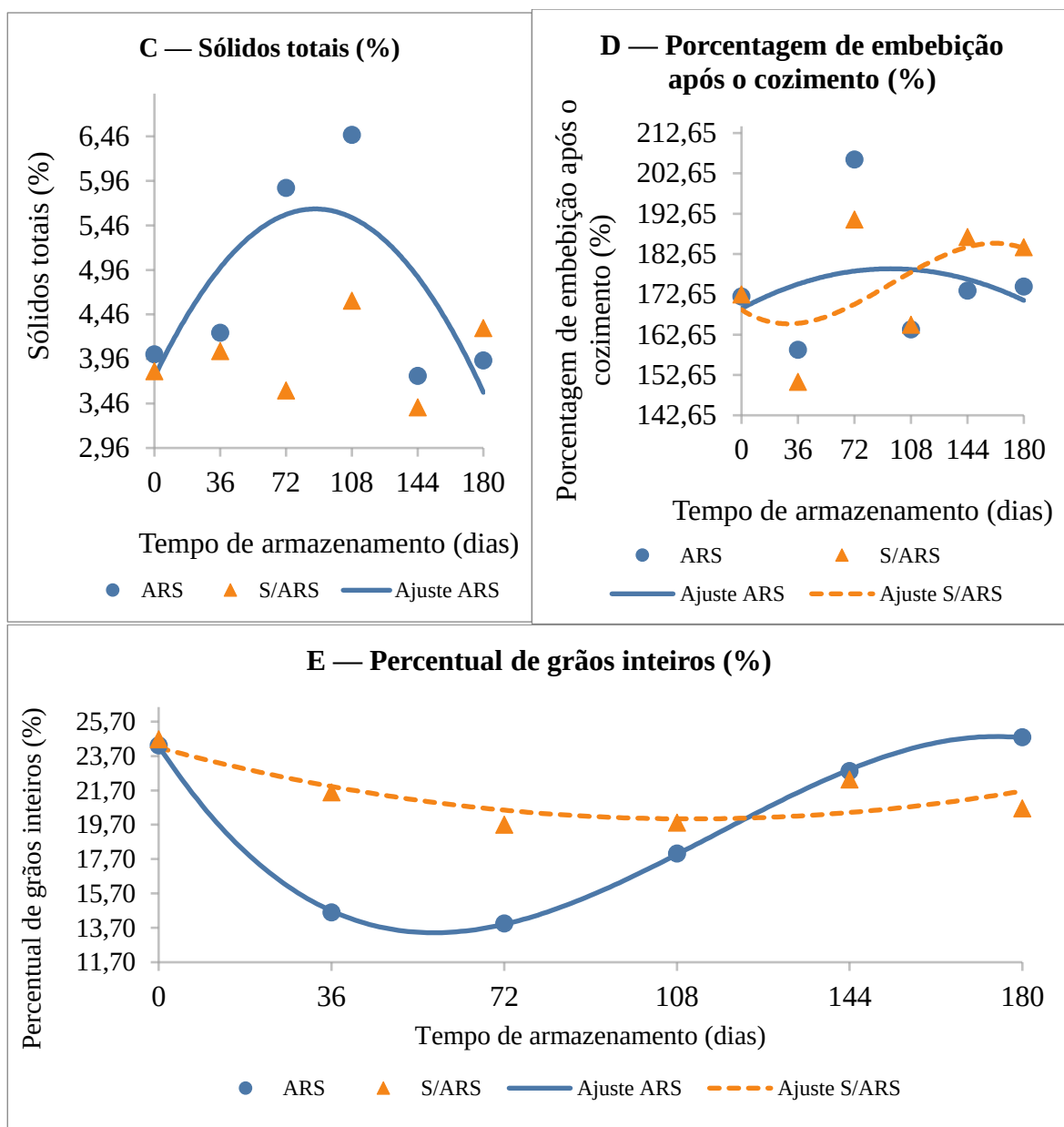
Figura 31. Regressões das variáveis tecnológicas dos grãos de feijão-comum em função do tempo de armazenamento, considerando os tratamentos de cultivo com aplicação de água residuária suína (CA) e sem aplicação de água residuária suína (AS): (A) tempo de cocção; (B) sólidos solúveis.



Para os sólidos solúveis, foram obtidos ajustes quadráticos em ambos os tratamentos. Nos grãos produzidos com água residuária, os valores aumentaram até o máximo estimado aos 82 dias, seguido de redução; no tratamento sem aplicação, houve decréscimo até o mínimo estimado aos 83 dias e posterior elevação (Figura 32B).

No que se refere aos sólidos totais, observou-se resposta quadrática apenas nos grãos provenientes do cultivo com aplicação de água residuária, com valor máximo estimado aos 88 dias. No tratamento sem aplicação do efluente, a ausência de ajuste significativo não permitiu identificar tendência temporal consistente para essa variável (Figura 32C).

Figura 32. Regressões das variáveis tecnológicas dos grãos de feijão-comum em função do tempo de armazenamento, considerando os tratamentos de cultivo com aplicação de água residuária suína (CA) e sem aplicação de água residuária suína (AS): (C) sólidos totais; (D) porcentagem de embebição após o cozimento; e (E) percentual de grãos inteiros.



Fonte: Os autores (2026).

Quanto à embebição após a cocção, os dados foram descritos por modelo quadrático no tratamento com aplicação de água residuária e por modelo cúbico naquele sem aplicação do efluente, caracterizando respostas não lineares ao longo do armazenamento (Figura 32D).

No que se refere ao percentual de grãos inteiros, observou-se redução nos períodos intermediários (0, 36 e 72 dias), seguida de recuperação ao final do armazenamento. Essa variação foi descrita por modelo cúbico no cultivo com água residuária e quadrático no tratamento sem aplicação do efluente (Figura 32E).

Quanto aos parâmetros de cor, as interações entre tipo de embalagem, tratamento de cultivo e período de armazenamento não foram significativas. Considerados isoladamente, o tratamento de cultivo afetou apenas o croma (C*), ao passo que o período de armazenamento exerceu efeito sobre a luminosidade (L*), o croma (C*) e o ângulo hue (h°). Os coeficientes de variação, situados entre 0,95 e 3,15%, enquadram-se como baixos segundo Pimentel-Gomes (2009), refletindo reduzida variabilidade residual e adequada precisão experimental (Tabela 12).

Tabela 12. Resumo da análise de variância (quadrado médio) dos valores médios de luminosidade (L), croma (C*) e ângulo hue (h) de grãos de feijão-comum submetidos a diferentes tipos de embalagem, tratamentos e tempos de armazenamento.

Quadrado Médio				
Fontes de Variação	G.L.	L*	C*	h
Tipo de Embalagem (TE)	2	2,377 ^{ns}	0,011 ^{ns}	0,009 ^{ns}
Tratamento (TRAT)	1	2,645 ^{ns}	3,666 ^{**}	1,231 ^{ns}
Tempo (T)	5	45,812 ^{**}	30,395 ^{**}	7,752 ^{**}
TE*TRAT	2	1,324 ^{ns}	0,380 ^{ns}	0,084 ^{ns}
TE*T	10	1,112 ^{ns}	0,163 ^{ns}	0,261 ^{ns}
TRAT*T	5	2,648 ^{ns}	0,630 ^{ns}	0,236 ^{ns}
TE*TRAT*T	10	0,661 ^{ns}	0,077 ^{ns}	0,158 ^{ns}
Resíduo	72	1,9	0,28	0,4
CV (%)	-	2,41	3,15	0,95

G.L. Graus de Liberdade; *Significativo a 5% de probabilidade pelo teste de F; ** Significativo a 1% pelo teste de F; ^{ns} Não Significativo.

Fonte: Os autores (2026).

A variável de cor croma dos grãos de feijão-comum apresentou diferença significativa entre os tratamentos de cultivo, sendo que os grãos produzidos sem aplicação de água residuária de suinocultura apresentaram o maior valor médio, correspondente a 17,01, enquanto aqueles provenientes do cultivo com aplicação do efluente apresentaram valor de 16,64 (Tabela 13).

Tabela 13. Valores médios de croma (C*) dos grãos de feijão-comum em função do tratamento de cultivo. CA: cultivo com aplicação de água residuária suína; AS: cultivo sem aplicação de água residuária de suinocultura.

Tratamento de cultivo	Croma (C*)
CA	16,64 a
AS	17,01 b
Média geral	16,83

Médias seguidas pela mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste t de Student a 5% de probabilidade.

Fonte: Os autores (2026).

Barreto *et al.* (2021), ao compararem grãos de feijão produzidos em sistemas orgânico e convencional, constataram que as condições de cultivo modificaram o teor de compostos fenólicos. Esses constituintes, especialmente flavonoides e antocianinas presentes no tegumento, participam da definição da coloração dos grãos (Chávez-Mendoza *et al.*, 2019). Assim, o menor croma observado no cultivo com água residuária pode estar relacionado à alteração na síntese ou na deposição desses compostos durante a formação do tegumento, resultando em coloração menos saturada.

O período de armazenamento alterou significativamente a coloração dos grãos de feijão-comum (Tabela 14). A luminosidade foi maior aos 0 e 36 dias e menor aos 180 dias, sem diferença significativa entre esse último período e 72 e 108 dias.

O croma não diferiu entre 0 e 36 dias, mas aumentou significativamente a partir de 72 dias, com diferenças significativas entre todos os períodos subsequentes e maior valor aos 180 dias. O ângulo hue apresentou os maiores valores aos 0 e 72 dias e o menor aos 180 dias, sem diferença significativa em relação a 108 e 144 dias.

Tabela 14. Valores médios de luminosidade (L*), croma (C*) e ângulo hue (h) dos grãos de feijão-comum em função do período de armazenamento.

Tempo de armazenamento (dias)	L*	C*	h°
0	59,54 c	15,44 a	68,01 c
36	58,89 c	15,73 a	66,84 b
72	56,27 ab	16,23 b	67,65 c
108	56,05 ab	16,92 c	66,66 ab
144	56,75 b	17,88 d	66,54 ab
180	55,78 a	18,78 e	66,40 a
Média	57,21	16,83	67,02

Médias seguidas por pelo menos uma letra igual na coluna não difere entre si pelo teste t de Fisher (LSD), a 5% de probabilidade.

No sistema CIELAB (CIE, 1976), a redução da luminosidade, associada ao aumento do croma e à diminuição do ângulo hue, caracteriza o desenvolvimento de uma coloração mais

escura, intensa e levemente avermelhada ao longo do armazenamento. Essa alteração pode estar relacionada à oxidação e à polimerização de compostos fenólicos presentes no tegumento, especialmente proantocianidinas, conforme relatado por Islam e Dhaubhadel (2025). O escurecimento também constitui um indicativo visual do envelhecimento dos grãos e pode ocorrer paralelamente às mudanças estruturais responsáveis pela menor capacidade de hidratação e pelo aumento do tempo de cocção.

3.4.2 Análise Multivariada

O tempo de cozimento (TC) dos grãos de feijão da cultivar Dama apresentaram uma correlação positiva e moderada ($r = 0.509$, $p < 0,05$) com a PEAPC, indicando-se que com o aumento no tempo de cozimento ocorre o incremento na absorção de água após o cozimento (Tabela 15).

Tabela 15. Estimativas das correlações de Pearson entre as variáveis de qualidade tecnológica e de cor do feijão carioca cultivar TAA Dama.

Variáveis	TC	BRIX	PEANC	PEAPC	PGI	ST	L*	C*	h
TC	1								
BRIX	-0.248	1							
PEANC	-0.112	0.877	1						
PEAPC	0.509	-0.155	-0.073	1					
PGI	0.241	0.237	0.087	-0.049	1				
ST	0.145	-0.637	-0.597	-0.233	-0.208	1			
L*	-0.658	-0.310	-0.427	-0.362	-0.454	0.321	1		
C*	0.918	-0.296	-0.193	0.350	0.212	0.258	-0.648	1	
h	-0.654	-0.027	-0.128	-0.519	0.200	0.094	0.520	-0.652	1

Nota: TC: tempo de cozimento, BRIX (teor de sólidos solúveis), PEANC (porcentagem de embebição de água antes do cozimento), PGI (porcentagem de grãos inteiros após cozimento), PEAC (porcentagem de embebição de água após o cozimento), L* (luminosidade), C* (croma) e h (ângulo hue). Valores das correlações destacados em negrito foram significativos estatisticamente ao nível de 5% de probabilidade através do Teste t.

Fonte: Os autores (2026).

TC também se correlacionou positivamente e fortemente com a variável de cor C* dos grãos ($r = 0,918$; $p < 0,05$), o que é observado na literatura, visto que com o armazenamento ocorre o incremento do tempo de cocção assim como para o caso das cultivares do grupo carioca, o aumento da intensidade cromática da cor apresentada pelo produto. Já as variáveis de cor L* e h correlacionaram-se negativamente e com força moderada com o tempo de cozimento, sendo seus valores de $r = -0.658$ e $r = -0.654$ ($p < 0,05$), respectivamente.

Essa relação é justificada com o processo de escurecimento que foi observado também na tabela 14, com a redução na luminosidade dos grãos de feijão da cultivar Dama ao longo do período de armazenamento e o incremento no tempo de cocção evidenciada na Tabelas 10.

O teor de sólidos solúveis (BRIX) se correlacionou fortemente e de maneira positiva com a PEANC ($r = 0.877$, $p < 0,05$), ou seja, quando foram observados maiores índices na capacidade de hidratação dos grãos antes do cozimento, também foram verificados maiores valores para os sólidos solúveis no caldo do feijão (Tabela 10).

Grãos de feijão que absorveram mais água durante o período de hidratação prévio ao cozimento apresentaram também altos valores de BRIX no caldo, ou seja, é evidenciado assim uma maior permeabilidade do tegumento neste produto, que garante essa maior lixiviação dos carboidratos e das proteínas solúveis. Porém, uma relação inversa foi verificada entre os índices do caldo BRIX e ST, com a correlação moderada e negativa ($r = -0,637$, $p < 0,05$), indicando que com o aumento no índice de sólidos solúveis, ocorreu redução na concentração de sólidos totais no caldo ao longo do processo de armazenagem.

A variável PEANC por sua vez apresentou correlações moderadas e negativas, de $r = -0,597$ e $0,427$ ($p < 0,05$), com ST e L^* , respectivamente. Desta forma, foi observado que com o incremento na capacidade de hidratação dos grãos de feijão antes do cozimento, ocorre a redução no índice de sólidos totais e na luminosidade do tegumento.

A PEAPC dos grãos apresentou correlação moderada e negativa com o parâmetro de cor h ($r = -0,519$, $p < 0,05$), indicando que quando o grão de feijão apresenta tegumentos com maiores valores no ângulo hue com cores mais amareladas ou amarronzadas, indicativas de escurecimento, os grãos irão absorver mais água após o processo de cocção.

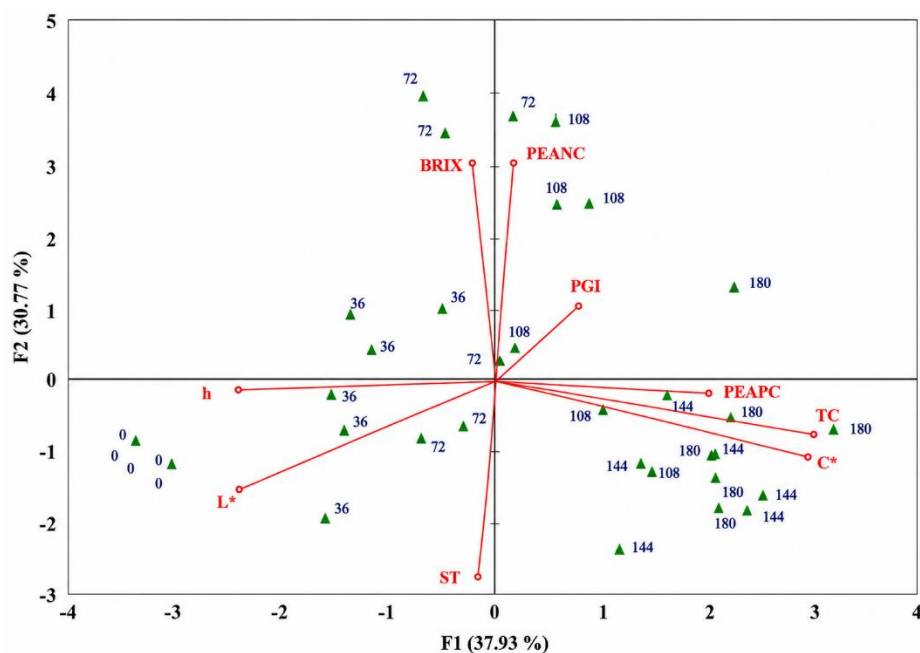
Neste estudo a PGI apresentou correlação moderada e negativa com a luminosidade do tegumento dos grãos de feijão ($r = -0,454$, $p < 0,05$), indicando que maiores índices de dano após o cozimento foram observados em grãos que apresentavam maiores valores para o parâmetro de cor L^* . Já entre L^* e C^* também se verificou essa correlação negativa e moderada ($r = -0,648$, $p < 0,05$), com isso afirma-se que em grãos de feijão carioca da cultivar Dama recém-colhidos são verificados maiores valores de luminosidade, porém com menores valores de intensidade cromática (Tabela 14).

Entre L^* e h ocorreu a correlação moderada e positiva moderada ($r = 0,520$, $p < 0,05$), verificando-se que quando ocorreram maiores valores para a luminosidade dos grãos, também foram observados incrementos nos valores de h . Por fim, a última correlação significativa observada foi entre o ângulo de coloração h e a intensidade cromática ($r = -0,652$), uma relação moderada e negativa que indica que neste experimento, quando ocorreu incremento no ângulo

de coloração com o escurecimento do tegumento dos grãos de feijão, ocorreu uma redução na intensidade ou pureza da cor apresentada.

Na Figura 33, apresentam-se os dois componentes principais dos dados, da análise gerada a partir das nove variáveis originais. Os componentes F1 e F2 apresentaram 68,70% de explicação para a variância dos resultados dos parâmetros avaliados nos grãos de feijão da cultivar Dama armazenamentos durante 180 dias.

Figura 33. Biplot resultante da análise de componentes principais (ACP) para as condições de armazenamento feijão da cultivar Dama provenientes de sistemas produtivos que utilizaram ou não a água residuária da suinocultura (expressas por) com os parâmetros de qualidade tecnológica dos grãos de (identificados por ●) sendo BRIX (teor de sólidos solúveis), PEANC (porcentagem de embebição de água antes do cozimento), PGI (porcentagem de grãos inteiros após cozimento), PEAC (porcentagem de embebição de água após o cozimento), TC (tempo de cozimento), L* (luminosidade), C* (croma) e h (ângulo hue).



Fonte: Os autores (2026).

Verifica-se a variação e a associação entre os parâmetros de qualidade tecnológica e de cor, sendo que para o componente principal F1 ocorreu maior contribuição das variáveis TC, PEAPC, L*, C* e h, com maiores valores para factor loadings da análise. Já para o componente F2 observou-se maiores contribuições das variáveis BRIX, PEANC e ST.

O Biplot apresenta a separação dos tempos de armazenagem avaliados no feijão carioca e verifica-se no que os grãos mais novos, avaliados aos 0, 36 e 72 dias foram posicionados nos quadrantes superior e inferior esquerdo. Essa diferenciação é evidenciada principalmente devido à característica de cor no tegumento L* com maiores valores no início da armazenagem

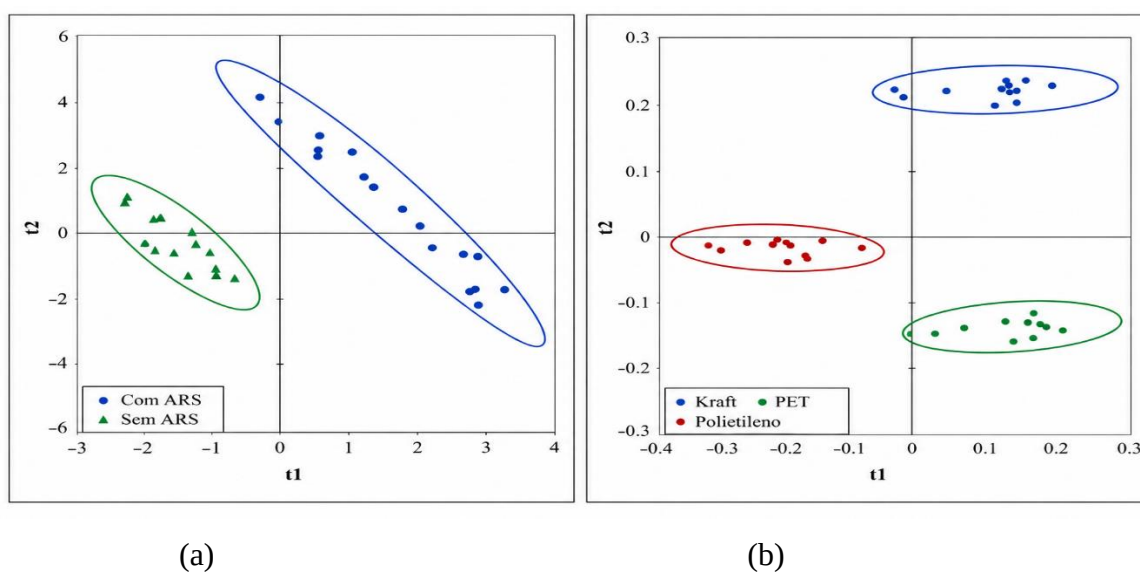
dos grãos da cultivar Dama. Assim como também ocorreram os maiores valores da variável BRIX no início da armazenagem, o que permite esse agrupamento nos quadrantes da ACP.

Já com relação aos grãos de feijão armazenados, com mensurações de qualidade aos 108 dias, observa-se que estão posicionadas no quadrante superior direito e foram as que apresentaram os maiores valores para os parâmetros de qualidade PEANC e PGI. Já os períodos de armazenagem de 144 e 180 dias, estão na sua maioria (com apenas uma exceção aos 180 dias) posicionados no quadrante inferior direito, com a contribuição das variáveis TC, PEAPC e C* contribuindo na diferenciação destes materiais.

O tempo de cocção elevado nos grãos armazenados, evidenciado na literatura (Wainaina *et al.* (2021), Abay e Tolesa (2023) e Khan *et al.* (2026)) é também observado nesse comportamento do feijão carioca da cultivar Dama, visto que na análise de componentes principais se vê essa variável de qualidade como um vetor importante nas amostras armazenadas.

Os modelos gerados na análise multivariada PLS-DA foram capazes de discriminar eficientemente as amostras de feijão provenientes dos diferentes sistemas de produção, empregando-se ou não a água residuária na irrigação (Figura 34a) e às diferentes embalagens no armazenamento (Figura 34b).

Figura 34. Scores plot resultante da análise PLS – DA apresentando a representação gráfica dos escores obtidos (t_1 x t_2) com as separações para os tratamentos na produção (Com ARS e Sem ARS) e as embalagens empregadas (Kraf, PET e polietileno) durante



Fonte: Os autores (2026).

No caso dos grãos produzidos empregando-se ou não a água residuária da suinocultura na irrigação do feijão, foram identificadas as variáveis de qualidade BRIX e PEANC com maiores valores para scores VIP (1,103 e 0,98 respectivamente). Ou seja, essas características de qualidade tecnológica foram as mais fortes que contribuíram para a diferenciação entre os grãos de feijão provenientes de tratamentos que receberam água residuária e os que não receberam durante o processo produtivo.

O uso da ARS pode então neste trabalho ter impactado na formação dos cotilédones do feijão, visto que com esse tratamento os grãos apresentaram menores valores de BRIX até os 144 dias de armazenamento (Tabela 10) quando comparados aos grãos provenientes do sistema de cultivo sem uso da ARS na irrigação.

Já em relação ao uso das diferentes embalagens durante o armazenamento, também foi possível empregar o modelo PLS-DA com a discriminação dos três grupos empregados durante o armazenamento do feijão (Figura 40b). Neste caso essa projeção foi possível devido aos maiores scores das variáveis de qualidade tecnológica ST, PEANC, PEAPC e L* (0,438; 0,437; 0,380 e 0,325; respectivamente), porém todos menores que 1. Porém, a título de informação, esses dados dessas variáveis são apresentados.

O que se observa na Figura 40b é que as amostras armazenadas foram posicionadas pelo modelo de regressão empregado foi efetivo em fazer a separação nos três quadrantes distintos. Sendo assim, o ambiente obtido pelas condições de armazenagem de grãos em cada embalagem avaliada, foi influenciado pelo tipo de material e a sua permeabilidade, o que pode ter implicado na maior velocidade ou não dos defeitos do feijão carioca da cultivar Dama, como o escurecimento e o endurecimento.

3.5 CONCLUSÕES

O tempo de armazenamento foi o principal fator associado às alterações de todas as variáveis analisadas de qualidade tecnológicas e colorimétricas dos grãos de feijão-comum.

Não houve interação significativa entre tipo de embalagem e tratamento de cultivo para as variáveis tecnológicas e colorimétricas avaliadas.

O tempo de cocção dos grãos de feijão-comum aumentou ao longo do armazenamento em todos os tratamentos de cultivo e tipos de embalagem avaliados, evidenciando-se o mecanismo *hard-to-cook*.

O efeito do tipo de embalagem sobre a qualidade tecnológica restringiu-se ao tempo de cocção e variou conforme o avanço do armazenamento.

A embalagem de polietileno proporcionou menor tempo de cocção ao final do armazenamento, em comparação à garrafa PET e à embalagem Kraft.

Os grãos provenientes do cultivo com aplicação de água residuária de suinocultura apresentaram menor tempo de cocção a partir de 108 dias de armazenamento.

Os teores de sólidos solúveis e sólidos totais foram maiores nos grãos provenientes do cultivo com aplicação de água residuária de suinocultura aos 72 e 108 dias.

O percentual de grãos inteiros apresentou maior valor ao final do armazenamento nos grãos provenientes do cultivo com aplicação de água residuária de suinocultura.

O período de armazenamento reduziu a luminosidade e o ângulo hue e aumentou o croma dos grãos de feijão-comum.

Os grãos produzidos sem aplicação de água residuária de suinocultura apresentaram maior croma que aqueles provenientes do cultivo com aplicação do efluente.

3.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAY, Melese Mulu; TOLESA, Getachew Neme. Effects of storage temperature and relative humidity on cooking time and moisture uptake of selected common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) varieties grown in Ethiopia. **Cogent Food & Agriculture**, [S. l.], v. 9, n. 1, art. 2163577, 2023. DOI: 10.1080/23311932.2022.2163577.

ADJEI, E. A.; BANFUL, B. K.; ASIEDU, E. A.; YEBOAH, S.; ASIBUO, J. Y. Effects of seed moisture content and packaging material on the biochemical quality of common bean seed in the humid tropics of Ghana. **Journal of Ghana Science Association**, [S. l.], v. 21, n. 1, p. 9–17, 2023.

ALMEIDA, Edmilson Igor Bernardo; FERRÃO, Gregori da Encarnação; MARQUES, Jordânio Inácio; SOUSA, Washington da Silva. **Perdas pós-colheita de frutas e hortaliças no Maranhão**: estimativas, causas, impactos e soluções. São Luís: EDUFMA, 2020.

AOAC INTERNATIONAL. **Official methods of analysis of AOAC International**. 17. ed. Gaithersburg, MD: AOAC International, 2008.

BARRETO, Nathália Martins Bomfim et al. Organic black beans (*Phaseolus vulgaris* L.) from Rio de Janeiro State, Brazil, present more phenolic compounds and better nutritional profile than nonorganic. **Foods**, Basel, v. 10, n. 4, art. 900, 2021. DOI: 10.3390/foods10040900.

BENTO, Juliana Aparecida Correia; FERREIRA, Karen Carvalho; BASSINELLO, Priscila Zaczuk; OOMAH, B. Dave. Factors affecting the cooking quality of stored carioca beans (*Phaseolus vulgaris*). **Italian Journal of Food Science**, [S. l.], v. 33, n. 4, p. 43–56, 2021a. DOI: 10.15586/ijfs.v33i4.2025.

BENTO, Juliana Aparecida Correia; RIBEIRO, Paulo Riceli Vasconcelos; BASSINELLO, Priscila Zaczuk; BRITO, Edy Sousa de; ZOCOLLO, Guilherme Julião; CALIARI, Márcio; SOARES JÚNIOR, Manoel Soares. Phenolic and saponin profile in grains of carioca beans during storage. **LWT – Food Science and Technology**, [S. l.], v. 139, art. 110599, 2021b. DOI: 10.1016/j.lwt.2020.110599.

BINOTI, Dione Henrique Breda; GARCIA, Giovanni de Oliveira; VIÇOSI, Karen Andreon; DALVI, Leandro Pin. Atributos químicos do solo cultivado com cana-de-açúcar fertirrigado com água residuária da suinocultura. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, Maringá, v. 17, n. especial, e11884, 2024. DOI: 10.17765/2176-9168.2024v17n.Especial.e11884.

CAVALCANTE, Adailza Guilherme; MEIRELLES, Flávia Constantino; FILLA, Vinicius Augusto; CAVALCANTE, Alian Cássio Pereira; LEMOS, Leandro Borges. Qualidade tecnológica de grãos de feijoeiro especial durante o armazenamento. **Nativa**, Sinop, v. 12, n. 1, p. 133–139, 2024. DOI: 10.31413/nat.v12i1.14264.

CHÁVEZ-MENDOZA, Celia; HERNÁNDEZ-FIGUEROA, Karla Ivonne; SÁNCHEZ, Esteban. Antioxidant capacity and phytonutrient content in the seed coat and cotyledon of common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) from various regions in Mexico. **Antioxidants**, Basel, v. 8, n. 1, art. 5, 2019. DOI: 10.3390/antiox8010005.

COELHO, Silvia Renata Machado; PRUDENCIO, Sandra Helena; NÓBREGA, Lúcia Helena Pereira; LEITE, Camila Ferreira Rocha. Alterações no tempo de cozimento e textura dos grãos de feijão-comum durante o armazenamento. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 33, n. 2, p. 539–544, mar./abr. 2009. DOI: 10.1590/S1413-70542009000200028.

COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ÉCLAIRAGE. **Colorimetry**: official recommendations of the CIE. 3. ed. Vienna: CIE Central Bureau, 2004. (CIE Publication, 15:2004).

DA ROS, Clovis Orlando; SILVA, Vanderlei Rodrigues da; SILVESTREIN, Thales Bonfanti; SILVA, Rodrigo Ferreira da; PESSOTTO, Patrícia Pretto. Disponibilidade de nutrientes e acidez do solo após aplicações sucessivas de água residuária de suinocultura. **Revista Brasileira de Tecnologia Agropecuária**, Frederico Westphalen, v. 1, n. 1, p. 35–44, 2017.

FERREIRA, Daniel Furtado. Sisvar: a guide for its bootstrap procedures in multiple comparisons. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 38, n. 2, p. 109–112, mar./abr. 2014. DOI: 10.1590/S1413-70542014000200001.

FERREIRA, Marcos David; SPRICIGO, Poliana Cristina. Colorimetria: princípios e aplicações na agricultura. In: FERREIRA, Marcos David (ed.). **Instrumentação pós-colheita em frutas e hortaliças**. Brasília, DF: Embrapa, 2017. p. 209–220.

FRANCIS, F. J. **Colorimetria e aplicações em alimentos**. Campinas: Instituto de Tecnologia de Alimentos, 1988.

GARCIA-VELA, L. A.; STANLEY, D. W. Water-holding capacity in hard-to-cook beans (*Phaseolus vulgaris*): effect of pH and ionic strength. **Journal of Food Science**, [S. l.], v. 54, n. 4, p. 1080–1081, 1989. DOI: 10.1111/j.1365-2621.1989.tb07950.x.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. **Métodos físico-químicos para análise de alimentos**. Coordenação de Odair Zenebon, Neus Sadocco Pascuet e Paulo Tiglea. 4. ed. São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 2008.

ISLAM, Nishat S.; DHAUBHADEL, Sangeeta. Molecular insights into postharvest seed coat darkening in common beans: a look beyond the P gene. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 16, art. 1595906, 2025. DOI: 10.3389/fpls.2025.1595906.

KAN, Lijiao; NIE, Shaoping; HU, Jielun; WANG, Sunan; BAI, Zhouya; WANG, Junqiao; ZHOU, Yaomin; JIANG, Jun; ZENG, Qin; SONG, Ke. Comparative study on the chemical composition, anthocyanins, tocopherols and carotenoids of selected legumes. **Food Chemistry**, [S. l.], v. 260, p. 317–326, 2018. DOI: 10.1016/j.foodchem.2018.03.148.

KHAN, Md. Junaaid; CHAUDHARY, Sindhu; ALI, Amanat; MANICKAVASAGAN, Annamalai. Hard-to-cook phenomenon in pulses: mechanistic insights, influencing factors, and detection perspectives. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 156, art. 109314, 2026. DOI: 10.1016/j.jfca.2026.109314.

KIGEL, Jaime. Culinary and nutritional quality of *Phaseolus vulgaris* seeds as affected by environmental factors. **Biotechnology, Agronomy, Society and Environment**, Gembloux, v. 3, n. 4, p. 205–209, 1999.

LEAL, Fábio Tiraboschi; BETTIOL, João Victor Trombeta; FILLA, Vinícius Augusto; COELHO, Anderson Prates; MINGOTTE, Fábio Luiz Checchio; LEMOS, Leandro Borges. Grain quality of common bean cultivars under low and high nitrogen dose. **Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias UNCuyo**, Mendoza, v. 53, n. 1, p. 118–127, 2021. DOI: 10.48162/rev.39.012.

LIMA, Rafaella Araújo Zambaldi; TOMÉ, Laís Moretti; ABREU, Celeste Maria Patto de. Embalagem a vácuo: efeito no escurecimento e endurecimento do feijão durante o armazenamento. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 44, n. 9, p. 1664–1670, set. 2014. DOI: 10.1590/0103-8478cr20120832.

MATOS, Amanda Rayana Gomes; SILVA, Nathália Prates. **Teor de água em grãos de milho armazenados em diferentes ambientes e embalagens**. 2019. 27 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) – Faculdade Metropolitana de Anápolis, Anápolis, 2019.

MOMANYI, Micah Rambeka; NDUKO, John Masani; OMWAMBA, Mary. Effect of hermetic Purdue Improved Crop Storage (PICS) bag on chemical and anti-nutritional properties of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) varieties during storage. **Current Research in Food Science**, [S. l.], v. 5, p. 107–116, 2022. DOI: 10.1016/j.crfs.2021.12.014.

NEVES, Eletisanda; SAVELLI, Roberto. Determinação da perda de peso de grãos de milho armazenados através de diferentes métodos. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 14, n. 26, p. 257–270, 2017.

NGUYEN, Thi Hoai An; TAFIIRE, Henry; VAN LOEY, Ann; HENDRICKX, Marc E. Mechanisms of the hard-to-cook phenomena in common beans: a quantitative microscopic perspective. **LWT**, v. 250, art. 119452, 2026. DOI: 10.1016/j.lwt.2026.119452.

NJOROGE, Daniel M.; KINYANJUI, Peter K.; CHIGWEDERE, Claire M.; CHRISTIAENS, Stefanie; MAKOKHA, Anselimo O.; SILA, Daniel N.; HENDRICKX, Marc E. Mechanistic insight into common bean pectic polysaccharide changes during storage, soaking and thermal treatment in relation to the hard-to-cook defect. **Food Research International**, [S. l.], v. 81, p. 39–49, 2016. DOI: 10.1016/j.foodres.2015.12.024.

OLIVEIRA, G. P. **Diversidade genética em feijoeiro baseada em parâmetros tecnológicos na colheita e após armazenamento**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2024.

PAZ, Carlos Henrique de Oliveira. **Branqueamento, hidratação e secagem no processamento de feijão-comum**. 2024. 119 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2024.

PERINA, Eduardo Fernandes. **Qualidade tecnológica de grãos de feijoeiro (*Phaseolus vulgaris*) cultivados em diferentes ambientes**. 2008. 150 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto Agrônomo, Campinas, 2008.

PERINA, Eliana Francischinelli; CARVALHO, Cássia Regina Limonta; CHIORATO, Alisson Fernando; GONÇALVES, João Guilherme Ribeiro; CARBONELL, Sérgio Augusto Moraes. Avaliação da estabilidade e adaptabilidade de genótipos de feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) baseada na análise multivariada da “performance” genotípica. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 34, n. 2, p. 398–406, mar./abr. 2010. DOI: 10.1590/S1413-70542010000200018.

PIMENTEL-GOMES, Frederico. **Curso de estatística experimental**. 15. ed. Piracicaba: FEALQ, 2009.

PROCTOR, J. R.; WATTS, B. M. Development of a modified Mattson Bean Cooker procedure based on sensory panel cookability evaluation. **Canadian Institute of Food Science and Technology Journal**, [S. l.], v. 20, n. 1, p. 9–14, 1987. DOI: 10.1016/S0315-5463(87)70662-2.

R CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2026.

REYES-MORENO, Cuauhtémoc; PAREDES-LÓPEZ, Octavio. Hard-to-cook phenomenon in common beans: a review. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, [S. l.], v. 33, n. 3, p. 227–286, 1993. DOI: 10.1080/10408399309527621.

SARTORI, Maria Regina. **Technological quality of dry beans (*Phaseolus vulgaris* L.) stored under nitrogen**. 1982. Tese (Doutorado) – Kansas State University, Manhattan, 1982.

SILVA, Amanda Martins. **Armazenamento de sementes de grão-de-bico em embalagem hermética e papel em diferentes ambientes**. 2021. 41 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Sementes) – Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2021.

SOUSA, Guiomar Almeida; HERNANDES, Emanuele Elisa; DAMASCENO, Sana Souza; MATTAR, Eduardo Pacca Luna; SIVIERO, Amauri. Qualidade de feijão-caupi crioulo do Alto Juruá armazenado em embalagem a vácuo. **Revista Conexão na Amazônia**, Rio Branco, v. 2, edição especial VI Conc&T, p. 21–39, 2021.

STANLEY, D. W.; AGUILERA, José Miguel. A review of textural defects in cooked reconstituted legumes: the influence of structure and composition. **Journal of Food Biochemistry**, [S. l.], v. 9, p. 277–323, 1985. DOI: 10.1111/j.1745-4514.1985.tb00355.x.

TOILI, Mary Esther Muyoka; DE KONING, Ramon; KIEKENS, Raphaël; NDUMBA, Nelson; WAHOME, Samuel; ANAMI, Sylvester; GITHIRI, Stephen Mwangi; ANGENON, Geert. Transcriptome-guided identification of pectin methyl-esterase-related enzymes and novel molecular processes effectuating the hard-to-cook defect in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). **Foods**, Basel, v. 11, n. 12, art. 1692, 2022. DOI: 10.3390/foods11121692.

WAINAINA, Irene Njoki; WAFULA, Elizabeth; SILA, Daniel N.; KYOMUGASHO, Clare; GRAUWET, Tara; VAN LOEY, Ann; HENDRICKX, Marc E. Thermal treatment of common beans (*Phaseolus vulgaris* L.): factors determining cooking time and its consequences for sensory and nutritional quality. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, [S. l.], v. 20, n. 4, p. 3690–3718, 2021. DOI: 10.1111/1541-4337.12770.

ZIA-UR-REHMAN; SAMREEN, S.; SHAH, W. H. Effect of cooking method and length of cooking time on nutritive value of various bean broths. **Pakistan Journal of Scientific and Industrial Research**, [S. l.], v. 46, n. 5, p. 358–362, 2003.