



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA GOIANO – IF GOIANO - CÂMPUS RIO VERDE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS
Rodovia Sul Goiana, km 01, Zona Rural – Rio Verde - GO
CEP: 75.901-970. Fones: (64) 3620-5641. Fax: (64) 3620-5640

**RESÍDUO DE TANQUES DE CULTIVO DO PEIXE PINTADO COMO
ALTERNATIVA PARA A PRODUÇÃO DE TOMATE TIPO ‘GRAPE’:
CARACTERÍSTICAS FISIOLÓGICAS, CRESCIMENTO E COMPONENTES DE
PRODUÇÃO**

Orientador: Prof. Dr. Alan Carlos da Costa
Coorientador: Prof. Dr. Adinan Alves da Silva
Doutorando: Igor Eli da Silva

**Rio Verde – GO
Setembro – 2025**



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA GOIANO – IF GOIANO - CÂMPUS RIO VERDE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS
Rodovia Sul Goiana, km 01, Zona Rural – Rio Verde - GO
CEP: 75.901-970. Fones: (64) 3620-5641. Fax: (64) 3620-5640

**RESÍDUO DE TANQUES DE CULTIVO DO PEIXE PINTADO COMO
ALTERNATIVA PARA A PRODUÇÃO DE TOMATE TIPO ‘GRAPE’:
CARACTERÍSTICAS FISIOLÓGICAS, CRESCIMENTO E COMPONENTES DE
PRODUÇÃO**

Orientador: Prof. Dr. Alan Carlos da Costa
Coorientador: Prof. Dr. Adinan Alves da Silva
Doutorando: Igor Eli da Silva

Tese apresentada, como parte das exigências para obtenção do título de DOUTOR EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS-AGRONOMIA, no Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias - Agronomia do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde, Área de concentração em Produção Vegetal Sustentável no Cerrado.

**Rio Verde – GO
Setembro – 2025**

**Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema Integrado de Bibliotecas do IF Goiano - SIBi**

S586r	Silva, Igor Eli da RESÍDUO DE TANQUES DE CULTIVO DO PEIXE PINTADO COMO ALTERNATIVA PARA A PRODUÇÃO DE TOMATE TIPO 'GRAPE': CARACTERÍSTICAS FISIOLÓGICAS, CRESCIMENTO E COMPONENTES DE PRODUÇÃO / Igor Eli da Silva. Rio Verde 2025. 91f. il. Orientador: Prof. Dr. Alan Carlos da Costa. Coorientador: Prof. Dr. Adinan Alves da Silva. Tese (Doutor) - Instituto Federal Goiano, curso de 0232014 - Doutorado em Ciências Agrárias - Agronomia - Rio Verde (Campus Rio Verde). I. Título.
-------	---

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

- | | |
|--|---|
| ☒ Tese (doutorado) | ☐ Artigo científico |
| ☐ Dissertação (mestrado) | ☐ Capítulo de livro |
| ☐ Monografia (especialização) | ☐ Livro |
| ☐ TCC (graduação) | ☐ Trabalho apresentado em evento |

☐ Produto técnico e educacional - Tipo:

Nome completo do autor:

Igor Eli da Silva

Matrícula:

2021202320140004

Título do trabalho:

Resíduo de tanques de cultivo do peixe Pintado como alternativa para a produção de tomate tipo 'grape': Características fisiológicas, crescimento e componentes de produção

RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial: ☒ Não ☐ Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: 14 /05 /2026

O documento está sujeito a registro de patente? ☐ Sim ☒ Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? ☐ Sim ☒ Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O(a) referido(a) autor(a) declara:

- Que o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- Que obteve autorização de quaisquer materiais incluídos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- Que cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Documento assinado digitalmente
gov.br
IGOR ELI DA SILVA
Data: 26/05/2026 14:55:20 -0300
Verifique em <https://validar.ifg.gov.br>

Rio Verde

Local

14 /05 /2026

Data

Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos autorais

Ciente e de acordo:

Documento assinado digitalmente
gov.br
ALAN CARLOS DA COSTA
Data: 26/05/2026 11:03:30 -0300
Verifique em <https://validar.ifg.gov.br>

Assinatura do(a) orientador(a)



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Ata nº 113/2025 - SREPG/CMPR/CPG-RV/DPGPI-RV/CMPRV/IFGOIANO

ATA Nº/164

BANCA EXAMINADORA DE DEFESA DE TESE

Aos vinte e seis dias do mês de setembro do ano de dois mil e vinte e cinco, às 14:00, reuniram-se os componentes da Banca Examinadora: sob a presidência do primeiro, Prof. Dr. Alan Carlos da Costa (Presidente); Prof. Dr. Roberto Gomes Vidal (Avaliador externo); Prof. Dr. Marconi Batista Teixeira (Avaliador interno) Profa. Dra. Caroline Müller (Avaliadora interna) e Profa. Dra. Luciana Minervina de Freitas Moura (Avaliadora interna) em sessão pública realizada no IF Goiano – Campus Rio Verde, para procederem a avaliação da defesa de Tese, em nível de Doutorado, de autoria de **IGOR ELI DA SILVA**, discente do Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias – Agronomia do Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde. A sessão foi aberta pelo presidente da Banca Examinadora, Prof. Dr. Alan Carlos da Costa (Presidente), que fez a apresentação formal dos membros da Banca. A palavra, a seguir, foi concedida a autora da Tese para, em 40 min., proceder à apresentação de seu trabalho. Terminada a apresentação, cada membro da banca arguiu a examinada, tendo-se adotado o sistema de diálogo sequencial. Terminada a fase de arguição, procedeu-se a avaliação da defesa. Tendo-se em vista as normas que regulamentam o Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias – Agronomia, e procedidas às correções recomendadas, a Tese foi APROVADA, considerando-se integralmente cumprido este requisito para fins de obtenção do título de **DOCTOR EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS-AGRONOMIA**, na área de concentração Produção Vegetal Sustentável no Cerrado, pelo Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde. A conclusão do curso dar-se-á quando da entrega na secretaria do PPGCA-AGRO da versão definitiva da Tese, com as devidas correções. Assim sendo, esta ata perderá a validade se não cumprida essa condição, em até **60** (sessenta) dias da sua ocorrência. A Banca Examinadora recomendou a publicação dos artigos científicos oriundos dessa Tese em periódicos de circulação nacional e/ou internacional, após procedida as modificações sugeridas. Cumpridas as formalidades da pauta, a presidência da mesa encerrou esta sessão de defesa de Tese de Doutorado, e para constar, eu, Vanilda Maria Campos, secretária do PPGCA-AGRO, lavrei a presente Ata, que, após lida e achada conforme, será assinada pelos membros da Banca Examinadora.

Prof. Dr. Alan Carlos da Costa (Presidente)

Prof. Dr. Roberto Gomes Vidal (Avaliador externo)

Prof. Dr. Marconi Batista Teixeira (Avaliadora interna)

Profa. Dra. Caroline Müller (Avaliadora interna)

Profa. Dra. Luciana Minervina de Freitas Moura (Avaliadora interna)

Documento assinado eletronicamente por:

- Alan Carlos da Costa, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLÓGICO, em 04/12/2025 10:08:40.
- Roberto Gomes Vital, Roberto Gomes Vital - Professor Avaliador de Banca - Ueg (0111258000171), em 04/12/2025 10:18:03.
- Marconi Batista Teixeira, COORDENADOR(A) DE CURSO - FUC0001 - CCMDAGRO-R, em 05/12/2025 18:41:53.
- Caroline Muller Amaral, 2024202344060001 - Discente, em 11/12/2025 09:42:47.
- Luciana Minervina de Freitas Moura, 2022202344060003 - Discente, em 11/12/2025 09:48:13.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 24/09/2025. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar_documento/ e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 747808

Código de Autenticação: 79c8274116



INSTITUTO FEDERAL GOIANO

Campus Rio Verde

Rodovia Sul Goiana, Km 01, Zona Rural, 01, Zona Rural, RIO VERDE / GO, CEP 75901-970

(64) 3624-1000

AGRADECIMENTOS

A Deus, princípio e fim de todas as coisas, rendo minha primeira e mais profunda gratidão. Agradeço não apenas pela inspiração para iniciar este trabalho, mas pela força diária na perseverança, pela clareza nos momentos de confusão e por permitir enxergar na ciência agrária um caminho para servir. Toda honra e toda glória sejam dadas a ele, que, por meio de sua infinita providência, tornou esta jornada possível.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Alan Carlos da Costa, agradeço pela orientação segura e pela sabedoria compartilhada. Seus questionamentos sempre pertinentes e paciência foram o estímulo de que precisei para superar os desafios. Muito obrigado pela orientação acadêmica e pessoal. Agradeço também ao meu coorientador, Prof. Dr. Adinan Alves da Silva, por suas valiosas contribuições, disponibilidade e paciência.

Aos membros da banca examinadora, Profs. Dr. Marconi Batista Teixeira, Dr. Roberto Gomes Vital, Dra. Caroline Müller e Dra. Luciana Minervina de Freitas Moura, minha gratidão pelo tempo dedicado à leitura e arguição deste trabalho. Suas perspectivas e sugestões foram cruciais para o aprimoramento da versão final desta tese.

Expresso meu reconhecimento ao Instituto Federal Goiano Campus Rio Verde e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias, que me acolheram e forneceram a estrutura necessária para meu desenvolvimento. Esta pesquisa foi realizada com o apoio financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), a quem sou imensamente grato pela bolsa de estudos concedida. Agradeço também à FINEP, CNPq, FAPEG, CEAGRE, EMBRAPPII, CEBIO, IF Goiano, FUNAP e MCTI pelo apoio em estrutura e financiamento do projeto.

A rotina no Laboratório de Ecofisiologia e Produtividade Vegetal não teria sido a mesma sem o companheirismo e a colaboração de meus colegas. Agradeço a Isabel, Emily, Ketlyn, Luciana, demais estudantes de iniciação científica (ICs), mestrandos e doutorandos, pelas discussões produtivas, pela ajuda nas análises e, principalmente, pela amizade. Um agradecimento especial a todas as pessoas que auxiliaram diretamente e indiretamente com esse trabalho citando os estudantes de ICs Samira, Abel, Isadora, Muryllo e Moises, os fornecedores do material de estudo Sinomar e Fábria por todo o suporte prático que foi fundamental para a execução dos experimentos.

À minha amada família, meu alicerce. Aos meus pais, Eli da Silva e Ilma Glória de Jesus da Silva, à minha irmã Erika Ester da Silva por todo o sacrifício, amor e por terem me ensinado o valor do estudo e do trabalho honesto. À minha namorada, Kelle da C. Oliveira, por ser meu

refúgio, pela paciência infinita nos dias de cansaço e ausência, e por acreditar em mim. Aos meus sobrinhos, Leonardo e Felipe, por serem a alegria que ressignifica qualquer dificuldade.

Aos meus amigos, de perto e de longe, que souberam oferecer uma palavra de ânimo ou uma pausa para o café, essenciais para a saúde mental. Vocês foram a prova de que nenhuma jornada se faz só.

A todos que, de alguma forma, fizeram parte desta história, meu mais sincero muito obrigado.

BIOGRAFIA DO AUTOR

IGOR ELI DA SILVA, filho de Eli da Silva e Ilma Glória de Jesus da Silva, nasceu dia 10 de setembro de 1996, na cidade de Ceres, Goiás. Em janeiro de 2014, ingressou no curso de Bacharelado em Zootecnia no Instituto Federal Goiano, Campus Ceres – Goiás, graduando-se em Zootecnia de 2019. Em fevereiro de 2019, iniciou no curso de Mestrado pelo Programa de Pós-Graduação em Zootecnia, no Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde, concluindo em setembro de 2021. Em agosto de 2021, ingressou no Doutorado pelo Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias – Agronomia, no Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde, sob a orientação do professor Alan Carlos Costa, concluindo com a defesa da tese em setembro de 2025.

b

ÍNDICE GERAL

1. Sumário

ÍNDICE DE FIGURAS E TABELAS	x
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES	xiii
RESUMO	1
ABSTRACT	2
INTRODUÇÃO GERAL	3
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	4
OBJETIVOS	6
CAPÍTULO I	7
1. INTRODUÇÃO	9
2. MATERIAL E MÉTODOS	11
2.1. Caracterização do local do experimento e delineamento experimental	11
2.2 Obtenção, Preparo e Caracterização do Resíduo de Piscicultura	12
2.3 Preparo dos substratos e Tratamentos	13
2.4 Preparo das Mudas e Transplântio	15
2.5 Condução do Experimento e Adubação de Cobertura	15
2.6 Variáveis fisiológicas	16
2.7 Variáveis morfológicas	17
2.8 Variáveis de produção	17
2.9 Análises estatísticas	17
3. RESULTADOS	18
3.1. Análise de variância geral	18
3.2. Interação dose × estágio nas variáveis com interação significativa	19
3.3. Efeito principal das doses de resíduo	21
3.4. Efeito do estágio fenológico	22
3.5. Variáveis não influenciadas pelos tratamentos	23
3.6. Crescimento, biomassa e componentes de produção	24
4. DISCUSSÃO	26
4.1. Resposta Fotossintética	26
4.2. Efeitos fisiológicos da dose	27
4.3. Fisiologia e produção final de frutos	27
5. Conclusão	28
6. Referências Bibliográficas	29
CAPÍTULO II	34
1. INTRODUÇÃO	36
2. MATERIAL E MÉTODOS	38
2.1. Caracterização do local do experimento e delineamento experimental	38

2.2.	Preparo dos substratos	39
2.3.	Adubação de cobertura.....	41
2.4.	Preparo das mudas.....	42
2.5.	Avaliações	43
2.5.1.	Variáveis fisiológicas.....	43
2.5.2	Pigmentos de cloroplasto.....	44
2.5.3	Variáveis morfológicas.....	44
2.5.4	Variáveis de produção	44
2.5.5	Produção de Frutos.....	45
2.5.6	Qualidade Físico-Química dos Frutos	45
2.5.7	Determinação de Danos às Membranas Celulares.....	45
2.5.8	Determinação da Atividade Enzimática	45
2.6	Análises estatísticas	46
3.	Resultados.....	47
3.1.	Trocas Gasosas	47
3.2.	Fluorescência da Clorofila a.....	49
3.3.	Pigmentos Fotossintéticos	54
3.4.	Variáveis Morfológicas e de Crescimento.....	57
3.5.	Variáveis de Produção e Qualidade dos Frutos	59
3.5.1.	Produção de Frutos	59
3.5.2.	Qualidade Físico-Química dos Frutos.....	60
3.5.3.	Coloração da Polpa dos Frutos.....	61
3.6.	Metabolismo Antioxidativo e Dano Celular.....	63
4.	Discussão	65
5.	Conclusão	68
6.	Referências Bibliográficas.....	68
7.	Conclusão Geral.....	74

ÍNDICE DE FIGURAS E TABELAS

Lista de Tabelas

Capítulo I

Tabela 1 – Características químicas do resíduo sólido de piscicultura de pintado utilizado na composição dos tratamentos.

Tabela 2 – Análise físico-química do substrato base, formulado com Latossolo Vermelho distroférico e areia (2:1, v/v), utilizado como tratamento controle e para a composição dos demais tratamentos.

Tabela 3 – Quantidade final de nutrientes (mg dm^{-3}) em cada tratamento, compostos por substrato (solo + areia), e diferentes proporções de resíduo de piscicultura de pintado.

Tabela 4 – Quantidade total de sais e soluções aplicadas via fertirrigação de cobertura para cada tratamento.

Tabela 5 – Resumo da análise de variância (ANOVA) para as variáveis fisiológicas e morfológicas de plantas do tomateiro cv. 'Sweet Heaven' cultivadas com diferentes doses de resíduo de piscicultura, avaliadas em dois estádios fenológicos.

Tabela 6 – Desdobramento da interação entre doses de resíduo de piscicultura e estádios fenológicos para a taxa fotossintética (A) e altura de plantas do tomateiro cv. 'Sweet Heaven'.

Tabela 7 – Efeito principal das diferentes doses de resíduo de piscicultura sobre variáveis fisiológicas de plantas do tomateiro cv. 'Sweet Heaven'.

Tabela 8 – Efeito principal do estágio de desenvolvimento (vegetativo e reprodutivo) sobre as características fisiológicas e morfológicas de plantas do tomateiro cv. 'Sweet Heaven'.

Tabela 9 – Valores médios e p-valores para as variáveis fisiológicas e morfológicas do tomateiro cv. 'Sweet Heaven' que não foram significativamente influenciadas pelos fatores Dose e Estádio.

Tabela 10 – Resumo da Análise de Variância (ANOVA) para as variáveis de crescimento, biomassa e produção do tomateiro (*Solanum lycopersicum* cv. 'Sweet Heaven') cultivado em substrato com diferentes doses de resíduo de pintado.

Tabela 11 – Médias de número de frutos e massa total de frutos (g) do tomateiro cv. 'Sweet Heaven' submetido a diferentes doses de resíduo de piscicultura.

Capítulo II

Tabela 1 – Tratamentos utilizados no cultivo de plantas do tomateiro cv. 'Sweet Heaven' compostos por substrato padrão (solo:areia, 2:1 v/v), com adubação mineral e tratamentos com diferentes proporções de resíduos do viveiro escavado de piscicultura para o cultivo de pintado.

Tabela 2 – Caracterização físico-química do substrato base (Latossolo Vermelho distroférico e areia, 2:1 v/v) utilizado como controle e na formulação dos demais tratamentos.

Tabela 3 – Caracterização físico-química do resíduo sólido da piscicultura de pintado (*Pseudoplatystoma corruscans*) utilizado na composição dos tratamentos.

Tabela 4 – Dose e fonte dos nutrientes aplicados via fertilização de base no substrato para o cultivo do tomateiro cv. 'Sweet Heaven'.

Tabela 5 – Composição da solução nutritiva utilizada na fertirrigação do tomateiro cv. 'Sweet Heaven' nas fases vegetativa (A) e reprodutiva (B), em função das diferentes doses de resíduo de piscicultura no substrato.

Lista de Figuras

Figura 1 – Taxa fotossintética líquida (A) do tomateiro cv. 'Sweet Heaven' em função de doses de resíduo sólido de pintado (A) e estádios de desenvolvimento (B).

Figura 2 – Taxa de transpiração (E ; A e B) e condutância estomática (g_s ; C e D) em tomateiro cv. 'Sweet Heaven', em função de doses de resíduo sólido de pintado (A e C) e estádios de desenvolvimento (B e D).

Figura 3 – Razão entre a concentração de CO_2 intercelular e extracelular (C_i/C_a) do tomateiro cv. 'Sweet Heaven' em função de doses de resíduo sólido de pintado (A) e estádios de desenvolvimento (B).

Figura 4 – Eficiência quântica máxima do fotossistema II (F_v/F_m) do tomateiro cv. 'Sweet Heaven' em função de doses de resíduo sólido de pintado (A) e estádios de desenvolvimento (B).

Figura 5 – Rendimento quântico efetivo do fotossistema II ($Y(II)$) do tomateiro cv. 'Sweet Heaven' em função de doses de resíduo sólido de pintado (A) e estádios de desenvolvimento (B).

Figura 6 – Interação entre doses de resíduo sólido de pintado (%) e estádios de desenvolvimento para o rendimento quântico da dissipação não fotoquímica (Y_{NPQ}) do tomateiro cv. 'Sweet Heaven'.

Figura 7 – Rendimento quântico da dissipação não regulada (Y_{No}) do tomateiro cv. 'Sweet Heaven' em função de doses de resíduo sólido de pintado (A) e estádios de desenvolvimento (B).

Figura 8 – Coeficiente de *quenching* fotoquímico (qP) do tomateiro cv. 'Sweet Heaven' em função de doses de resíduo sólido de pintado (A) e estádios de desenvolvimento (B).

Figura 9 – Taxa de transporte de elétrons (ETR) do tomateiro cv. 'Sweet Heaven' em função de doses de resíduo sólido de pintado (A) e estádios de desenvolvimento (B).

Figura 10 – Teores de pigmentos fotossintéticos em folhas do tomateiro cv. 'Sweet Heaven' em função das doses de resíduo de pintado e dos estádios fenológicos.

Figura 11 – Gráfico de interação dos fatores dose e estágio para a variável de altura da planta do tomateiro cv. 'Sweet Heaven' cultivado com substratos elaborados com diferentes doses de resíduo sólido de pintado.

Figura 12 – Efeito isolado das doses de resíduo sólido de pintado (A) e dos estádios fenológicos sobre o diâmetro do caule do tomateiro cv. 'Sweet Heaven'.

Figura 13 – Número de folhas (A e B) e número de nós (C e D) do tomateiro cv. 'Sweet Heaven', em função de doses de resíduo sólido de pintado e estádios de desenvolvimento.

Figura 14 – Variáveis de produção do tomateiro cv. 'Sweet Heaven' em função das doses de resíduo sólido de pintado. (A) Número de frutos. (B) Massa total de frutos (g). (C) Massa média dos frutos (g).

Figura 15 – Variáveis de qualidade físico-química de frutos do tomateiro cv. 'Sweet Heaven' em função das doses de resíduo sólido de pintado. (A) Sólidos solúveis totais (°Brix). (B) Acidez titulável (%). (C) pH.

Figura 16 – Parâmetros de coloração da polpa de frutos do tomateiro cv. 'Sweet Heaven' em função das doses de resíduo sólido de pintado. (A) Luminosidade (L*). (B) Coordenada a*. (C) Croma. (D) Ângulo Hue (°HUE).

Figura 17 – Metabolismo antioxidativo e dano celular do tomateiro cv. 'Sweet Heaven', apresentando a interação entre doses de resíduo sólido de pintado e estádios de desenvolvimento.

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES

Símbolos

a^* - Coordenada de cor no sistema CIELab (eixo verde-vermelho)

A - Taxa fotossintética líquida

ABS/RC - Absorção de energia por centro de reação

b^* - Coordenada de cor no sistema CIELab (eixo azul-amarelo)

$Chla$ - Clorofila a

$Chlb$ - Clorofila b

Ci/Ca - Razão entre a concentração interna e externa de CO_2

DIo/RC - Fluxo de energia dissipada por centro de reação

E - Taxa transpiratória

ETo/RC - Fluxo de transporte de elétrons por centro de reação

ETR - Taxa de transporte de elétrons

F_0 - Fluorescência inicial (folhas adaptadas ao escuro)

F_m - Fluorescência máxima (folhas adaptadas ao escuro)

F_m' - Fluorescência máxima (folhas adaptadas à luz)

F_s - Fluorescência em estado estacionário

F_v/F_m - Eficiência quântica máxima do Fotossistema II

g_s - Condutância estomática

H_2O_2 - Peróxido de hidrogênio

$^\circ HUE$ - Ângulo Hue (tonalidade da cor)

L^* - Luminosidade no sistema CIELab

NPQ - *Quenching* não fotoquímico

p - Nível de significância estatística

PI_{ABS} - Índice de performance para absorção de energia

qP - Coeficiente de *quenching* fotoquímico

Y_{II} - Rendimento quântico efetivo do Fotossistema II

Y_{NO} - Rendimento quântico da dissipação não regulada

Y_{NPQ} - Rendimento quântico da dissipação não fotoquímica

ΦDO - Rendimento quântico de dissipação de energia

ΦEO - Probabilidade de um éxciton mover um elétron pela cadeia transportadora de elétrons

Siglas e abreviações

AP - Altura da Planta

AT - Acidez Titulável

B - Boro

C Org- Carbono Orgânico

C/N - Relação Carbono/Nitrogênio

Ca - Cálcio

Car - Carotenoides totais

CAT - Catalase (enzima)

Cu - Cobre

DAS - Dias Após a Semeadura

DAT - Dias Após o Transplântio

DC - Diâmetro do Caule

DMSO - Dimetilsulfóxido

MS - Massa Seca

EDTA - Ácido Etilenodiamino Tetra-acético

Fe - Ferro

K - Potássio

K₂O - Óxido de Potássio

LVdf - Latossolo Vermelho distroférico

MDA - Malondialdeído

Mg - Magnésio

Mn - Manganês

MO - Matéria Orgânica

Mo - Molibdênio

MSPA - Massa Seca da Parte Aérea

N - Nitrogênio

Na - Sódio

NBT - p-nitrozol de tetrazólio

P - Fósforo

P₂O₅ - Pentóxido de Fósforo

PAR - Radiação Fotossinteticamente Ativa

pH - Potencial Hidrogeniônico

PMSF - Fluoreto de fenilmetilsulfonila

POX - Guaiacol Peroxidase (enzima)
 PRNT - Poder Relativo de Neutralização Total
 MSC - Massa Seca dos Colmos
 MSF - Massa Seca das Folhas
 FSII - Fotossistema II
 PVPP - Polivinilpirrolidona
 S - Enxofre
 SOD - Superóxido Dismutase (enzima)
 TBA - Ácido Tiobarbitúrico
 TCA - Ácido Tricloroacético
 Zn - Zinco

Unidades

% - Porcentagem
 °Brix - Sólidos solúveis totais (°Brix)
 °C - Grau Celsius
 Cm - Centímetro
 cmolc /dm^{-3} - Centimol de carga por decímetro cúbico
 cmolc kg^{-1} - Centimol de carga por quilograma
 g - Grama
 L - Litro
 $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ - por metro quadrado por segundo
 $\text{m}^{-1} \text{cm}^{-1}$ - Coeficiente de extinção molar
 mg dm^{-3} - Miligrama por decímetro cúbico
 mg kg^{-1} - Miligrama por quilograma
 mg L^{-1} - Miligrama por litro
 mg ha^{-1} - Miligrama por hectare
 min - Minuto
 mL - Mililitro
 mm - Milímetro
 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ - Milimol por metro quadrado por segundo
 $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ - Mol de água por metro quadrado por segundo
 nm - Nanômetro
 μg - Micrograma

μL - Microlitro

$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ - Micromol por metro quadrado por segundo

$\mu\text{mol mol}^{-1}$ - Micromol por mol

$\mu\text{mol min}^{-1} \text{mg}^{-1}$ - Micromol por minuto por miligrama

RESUMO

SILVA, I. E. **Resíduo de tanques de cultivo do peixe pintado como alternativa para a produção de tomate tipo ‘grape’: Características fisiológicas, crescimento e componentes de produção.** Setembro de 2025. Tese apresentada ao Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde - GO, como parte das exigências para obtenção do título de doutor no Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias. Orientador: DSc. Alan Carlos Costa. Coorientador: DSc. Adinan Alves da Silva.

A agricultura moderna enfrenta o desafio de garantir a segurança alimentar mitigando impactos ambientais associados ao uso intensivo de fertilizantes sintéticos. Em paralelo, a aquicultura gera resíduos ricos em nutrientes que constituem passivos ambientais. Esta tese validou o potencial do resíduo sólido da piscicultura de pintado (*Pseudoplatystoma corruscans*) como biofertilizante na produção de tomateiro cv. 'Sweet Heaven'. Foram investigados os efeitos de cinco doses de substituição do substrato pelo resíduo (0, 15, 30, 45 e 60%) sobre características agrônomicas, fisiológicas e metabólicas, em dois experimentos complementares. Os resultados demonstraram que o resíduo oriundo de viveiros escavados impactou positivamente o vigor e a fisiologia das plantas, com aumento linear da taxa fotossintética e do diâmetro do caule, conforme a elevação da dose. Embora a massa fresca de frutos não tenha diferido estatisticamente entre os tratamentos, a qualidade apresentou melhora expressiva: a dose de 30% proporcionou o maior teor de sólidos solúveis totais (°Brix). Contudo, doses elevadas (a partir de 45%) induziram custo fisiológico, evidenciado pelo aumento da peroxidação lipídica (MDA) e ativação de enzimas antioxidantes (SOD, CAT e POX), sobretudo na fase vegetativa. Conclui-se que o resíduo de pintado é um insumo de alto potencial, sendo a faixa de 30% a 45% recomendada para otimizar a qualidade do fruto e o desempenho fisiológico sem comprometer a produção.

Palavras-chave: biofertilizante; economia circular; estresse oxidativo; nutrição de plantas; *Pseudoplatystoma corruscans*; *Solanum lycopersicum* cv. Sweet Heaven.

ABSTRACT

SILVA, I. E. **Waste from pintado fish farming tanks as an alternative for ‘grape’ tomato production: Physiological characteristics, growth, and production components**. September 2025. Thesis presented to the Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde – GO, as part of the requirements to obtain the doctoral degree in the Graduate Program in Agricultural Sciences. Advisor: DSc. Alan Carlos Costa. Co-advisor: DSc. Adinan Alves da Silva.

Modern agriculture faces the challenge of ensuring food security while mitigating environmental impacts associated with the intensive use of synthetic fertilizers. In parallel, aquaculture generates nutrient-rich waste that constitutes an environmental liability. This thesis validated the potential of solid waste from pintado (*Pseudoplatystoma corruscans*) farming as a biofertilizer in 'Sweet Heaven' tomato plants. The effects of five substrate substitution doses (0, 15, 30, 45, and 60%) on agronomic, physiological, and metabolic characteristics were investigated in two complementary experiments. Results demonstrated that residue from earthen ponds positively impacted plant vigor and physiology, with a linear increase in photosynthetic rate and stem diameter as doses increased. Although fresh fruit mass did not statistically differ among treatments, quality showed marked improvement: the 30% dose provided the highest total soluble solids content (°Brix). However, high doses (from 45% onwards) induced a physiological cost, evidenced by increased lipid peroxidation (MDA) and activation of antioxidant enzymes (SOD, CAT, and POX), particularly in the vegetative stage. It is concluded that pintado waste is a high-potential input, with the 30% to 45% range recommended to optimize fruit quality and physiological performance without compromising production.

KEYWORDS: biofertilizer; circular economy; oxidative stress; plant nutrition; *Pseudoplatystoma corruscans*; *Solanum lycopersicum* cv; Sweet Heaven.

INTRODUÇÃO GERAL

A ciclagem de nutrientes nos ambientes de produção é de suma importância para a sustentabilidade ecológica dos sistemas, além de proporcionar redução de custos e menor uso de fontes naturais finitas (LIU *et al.*, 2023; JANES-BASSETT *et al.*, 2020). A busca pela maximização da produtividade agrícola para alimentar uma população crescente tem demandado volumes cada vez maiores de recursos, especialmente fertilizantes minerais (BASAVEGOWDA; BAEK, 2021). Visto que as reservas dessas fontes minerais são limitadas, a investigação de estratégias para otimização do seu uso e a busca por materiais substitutivos que mantenham os patamares produtivos ganham destaque no cenário mundial (LESIK *et al.*, 2022).

Enquanto a produção animal intensiva concentra nutrientes e gera subprodutos ricos em matéria orgânica, a produção vegetal depende da extração de recursos e da aplicação massiva de fertilizantes sintéticos para a reposição de nutrientes no solo (MIRONIUK *et al.*, 2023). O descarte inadequado de dejetos da produção animal tornou-se uma das principais fontes de poluição ambiental, causando contaminação de solos e eutrofização de corpos d'água. Paralelamente, a agricultura sofre com a degradação do solo e a crescente dependência de insumos externos, cujos custos econômicos e ambientais são cada vez mais insustentáveis (LI, 2022).

A solução pode estar justamente na conexão desses dois problemas. A transição para um modelo de economia circular na produção de alimentos pressupõe que resíduos de uma cadeia produtiva sejam valorizados como matéria-prima estratégica para uma agricultura mais sustentável. Nesse contexto, o aproveitamento de subprodutos da aquicultura como biofertilizantes para a horticultura apresenta-se como uma alternativa promissora e ainda pouco explorada.

Esta tese, portanto, investiga a interação entre esses dois sistemas produtivos, propondo uma conexão entre setores vitais para a economia e para a produção de alimentos. No Brasil, a piscicultura intensiva do pintado (*Pseudoplatystoma corruscans*), peixe de alto valor comercial, gera fluxo de resíduos decantáveis e não decantáveis que podem constituir um subproduto rico em nutrientes (MILANIN *et al.*, 2015).

O tomateiro (*Solanum lycopersicum*) figura entre as hortaliças de maior relevância socioeconômica no cenário nacional. Dentre os segmentos de mercado, o cultivo de tomates do tipo 'grape' (minitomates) tem apresentado expansão significativa, impulsionado pela demanda de consumidores por frutos com maior apelo sensorial e praticidade (BILBAO-SAINZ *et al.*, 2021). Dentre os minitomates, o cultivar Sweet Heaven, objeto deste estudo, destaca-se neste

nicho por apresentar elevado teor de sólidos solúveis totais (°Brix) e características organolépticas superiores. Contudo, para expressar pleno seu potencial genético e produtivo, essa variedade apresenta alta exigência nutricional, demandando manejo de fertilização constante e equilibrado (CRUZ-CHAMORRO *et al.*, 2024a), o que o torna um modelo ideal para a avaliação de novas fontes fertilizantes.

Estudos anteriores focaram principalmente no reúso da fração líquida dos sistemas de aquicultura na forma de fertirrigação. Entretanto, o potencial da fração sólida (resíduos decantáveis), por se tratar de um material mais concentrado e de manejo distinto, permanece pouco conhecido e ainda pouco explorado na literatura científica. Assim, a motivação desta pesquisa reside no estudo do potencial agrônomo desse resíduo sólido como base para a formulação de um novo fertilizante, bem como na compreensão de como afeta o crescimento, a produtividade, a fisiologia do tomateiro e a qualidade dos frutos comercializados.

Este trabalho foi estruturado em dois estudos complementares, apresentados nos capítulos seguintes. O primeiro artigo foca na investigação dos efeitos do biofertilizante sobre aspectos agrônômicos e produtivos, avaliando o crescimento das plantas e a produtividade. O segundo artigo aprofunda a análise, caracterizando as respostas metabólicas e fisiológicas das plantas e a qualidade dos frutos, buscando compreender a ação da nutrição orgânica, via resíduo de piscicultura, no funcionamento da planta e no valor qualitativo do alimento.

Esta tese busca avaliar o potencial de um novo tipo de insumo (resíduo de piscicultura), além de apresentar evidências científicas para um modelo de produção mais integrado, robusto e sustentável, no qual a solução para um problema ambiental torna-se essencial para uma agricultura mais eficiente e saudável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BASAVEGOWDA, N., & BAEK, K. H. (2021). Current and future perspectives on the use of nanofertilizers for sustainable agriculture: the case of phosphorus nanofertilizer. In *3 Biotech* (Vol. 11, Issue 7). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s13205-021-02907-4>
- CRUZ-CHAMORRO, I., SANTOS-SÁNCHEZ, G., MARTÍN, F., FERNÁNDEZ-PACHÓN, M. S., HORNERO-MÉNDEZ, D., & CERRILLO, I. (2024). Evaluation of the Impact of the Ripening Stage on the Composition and Antioxidant Properties of Fruits from Organically Grown Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) Spanish Varieties. *Foods*, 13(15). <https://doi.org/10.3390/foods13152337>

- JANES-BASSETT, V., DAVIES, J., ROWE, E. C., & TIPPING, E. (2020). Simulating long-term carbon nitrogen and phosphorus biogeochemical cycling in agricultural environments. *Science of the Total Environment*, 714, 136599. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136599>
- LESIK, P., POGORZELEC, K., BOCHENEK, A., SOBOTKA, P., BEDNARSKA, K., ANUSZKIEWICZ, A., OSUCH, T., SIENKIEWICZ, M., MAREK, P., NAWOTKA, M., & WOLIŃSKI, T. R. (2022). Three-Dimensional-Printed Mechanical Transmission Element with a Fiber Bragg Grating Sensor Embedded in a Replaceable Measuring Head. *Sensors*, 22(9), 3381. <https://doi.org/10.3390/s22093381>
- LI, Q. (2022). Perspectives on Converting Keratin-Containing Wastes Into Biofertilizers for Sustainable Agriculture. In *Frontiers in Microbiology* (Vol. 13). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.918262>
- LIU, W., ZHANG, Y., YU, M., XU, J., DU, H., ZHANG, R., WU, D., & XIE, X. (2023). Role of phosphite in the environmental phosphorus cycle. In *Science of the Total Environment* (Vol. 881). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163463>
- MILANIN, T., MENDES MAIA, A. A., RAMOS, M., SILVA, M., CARRIERO, M. M., & ADRIANO, E. A. (2015). Molecular phylogeny and ultrastructure of *Myxobolus* cf. *cuneus*, a parasite of patinga hybrid and *Henneguya pseudoplatystoma*, a parasite of pintado hybrid. *Acta Parasitologica*, 60(3), 442–450. <https://doi.org/10.1515/ap-2015-0061>
- MIRONIUK, M., SAMORAJ, M., WITEK-KROWIAK, A., GÓRECKI, H., MOUSTAKAS, K., & CHOJNACKA, K. (2023). Processing of nuisance animal waste into agricultural products. *Environmental Pollution*, 319. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120924>

OBJETIVOS

Objetivo Geral

Propor e validar cientificamente o uso do resíduo sólido da piscicultura do pintado (*Pseudoplatystoma corruscans*) como fertilizante na produção do tomateiro cv. Sweet Heaven, analisando, de forma integrada, seus efeitos sobre os componentes agronômicos, as respostas fisiológicas e metabólicas da planta e a qualidade nutricional dos frutos, como um modelo prático de economia circular na produção de alimentos.

Objetivos Específicos

- Caracterizar química e fisicamente o resíduo sólido da piscicultura do pintado, a fim de determinar o potencial nutricional e o potencial agronômico como matéria-prima para biofertilizante.
- Avaliar o impacto de diferentes doses do biofertilizante no desenvolvimento vegetativo e nos componentes de produção do tomateiro, quantificando o crescimento das plantas e a produtividade de frutos em comparação com a adubação convencional.
- Investigar as respostas fisiológicas e metabólicas do tomateiro à nutrição com o fertilizante em diferentes fases do ciclo de vida, analisando indicadores como trocas gasosas, eficiência fotossintética e síntese de compostos orgânicos.
- Determinar a influência das diferentes doses do biofertilizante na qualidade nutricional dos frutos, mensurando teores de sólidos solúveis e acidez, parâmetros de interesse para o mercado consumidor.
- Integrar os dados agronômicos, fisiológicos e de qualidade dos frutos para estabelecer o potencial agronômico e os benefícios do uso desse novo insumo, validando a conexão entre piscicultura e horticultura como estratégia integrada de uso de fertilizantes orgânicos e minerais para uma agricultura mais sustentável.

CAPÍTULO I

Resíduos de viveiro de pintado (*Pseudoplatystoma corruscans*) na produção de tomates: Impactos fisiológicos e produtivos

Resumo

A busca por modelos e práticas sustentáveis de produção de alimentos é uma realidade crescente. Este trabalho teve como objetivo avaliar o potencial do resíduo sólido de tanques de cultivo de pintado (*Pseudoplatystoma corruscans*) como fonte de fertilizante para o cultivo do tomateiro cv. Sweet Heaven, como alternativa à adubação química e para o aproveitamento sustentável desses resíduos. O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente ao acaso, em arranjo fatorial, com cinco níveis de incorporação do resíduo da piscicultura (0%, 15%, 30%, 45% e 60%) e dois estádios de desenvolvimento (vegetativo e reprodutivo), com sete repetições. Foram avaliadas as variáveis fisiológicas (trocas gasosas, pigmentos fotossintéticos e fluorescência da clorofila *a*), morfológicas (altura da planta e diâmetro do caule) e componentes de produção (massa média dos frutos e teor de sólidos solúveis totais). Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA), considerando os efeitos de dose, estágio de desenvolvimento e a interação entre os fatores, com desdobramento e testes de comparações múltiplas de Scott-Knott ($p < 0,05$) quando a interação foi significativa, utilizando o programa R (versão 4.3.2). A taxa fotossintética (*A*) foi a única variável que apresentou interação significativa entre estágio e dose do resíduo, com aumento nas doses intermediárias (15% e 30%) no estágio vegetativo e maior média no controle (0%) no estágio reprodutivo. O resíduo sólido demonstrou capacidade adequada para suprir parcialmente as demandas nutricionais do tomateiro em substituição à adubação química, mantendo ou melhorando o status fisiológico, as características morfológicas e os componentes de produção, especialmente nas doses de 15% e 30%.

Palavras-chave: bioinsumos; fertilização orgânica; fenologia; fotossíntese; piscicultura; reaproveitamento de resíduos; relação fonte-dreno; sustentabilidade.

Waste from pintado (*Pseudoplatystoma corruscans*) ponds in tomato production: Physiological and productive impacts

Abstract

The search for sustainable models and practices for food production is an increasing reality. This study aimed to evaluate the potential of solid waste from rearing tanks of pintado (*Pseudoplatystoma corruscans*) as a fertilizer source for the cultivation of ‘grape-type’ tomatoes (cv. Sweet Heaven), as an alternative to chemical fertilization and as a sustainable use of these residues. The experiment was carried out in a completely randomized design, in a factorial arrangement, with five levels of fish-farming residue incorporation (0%, 15%, 30%, 45%, and 60%) and two developmental stages (vegetative and reproductive), with seven replicates. Physiological variables (gas exchange, photosynthetic pigments, and chlorophyll *a* fluorescence), morphological traits (plant height and stem diameter), and yield components (average fruit weight and total soluble solids content) were evaluated. Data were subjected to analysis of variance (ANOVA), considering the effects of residue dose, developmental stage, and their interaction, with unfolding and Scott-Knott multiple comparison tests ($p < 0.05$) when significant interactions occurred, using R software (version 4.3.2). The photosynthetic rate (*A*) was the only variable that showed a significant interaction between stage and residue dose, with increases at intermediate doses (15% and 30%) during the vegetative stage, and higher mean values in control (0%) during the reproductive stage. The solid residue demonstrated adequate capacity to partially meet tomato nutritional demands as a substitute for chemical fertilization, maintaining or improving physiological status, morphological traits, and yield components, especially at doses of 15% and 30%.

Keywords: bioinputs; fish farming; organic fertilization; phenology; photosynthesis; waste recovery; source-sink relationship; sustainability.

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda global por alimentos representa um desafio tanto pela expansão de áreas agrícolas quanto pela necessidade de maximizar a eficiência dos sistemas produtivos (VALÉRIO, 2022). A eficiência produtiva está conectada à gestão da cadeia de suprimentos e às tecnologias empregadas, nas quais a fertilização e a irrigação são práticas consolidadas para o aumento do rendimento das culturas (COSTANTINI *et al.*, 2023). No entanto, ambas as estratégias apresentam impactos ambientais e econômicos significativos, como elevados custos dos insumos, poluição do solo e da água pelo uso de fertilizantes e salinização decorrente da irrigação (VICHIAN SAN *et al.*, 2022).

Nesse contexto, a busca por sistemas produtivos sustentáveis ganha relevância, especialmente com o reaproveitamento de resíduos agroindustriais que, quando descartados inadequadamente, causam degradação ambiental, incluindo eutrofização de corpos d'água e contaminação de lençóis freáticos (SAMPAIO; FREDO, 2021; PEREIRA *et al.*, 2020). A crescente preocupação com a degradação do solo e a perda de biodiversidade, somada ao alto custo dos fertilizantes, tem estimulado a busca por recursos alternativos para a nutrição vegetal (BORGES *et al.*, 2021).

A piscicultura intensiva gera efluentes ricos em nutrientes, principalmente nitrogênio (N) e fósforo (P), cuja assimilação pelos peixes é estimada a cerca de 30% (MERCANTE; CARMO; OSTI, 2020). Consequentemente, há considerável excreção na forma sólida (25-30%), além da principal fração do nitrogênio ser liberada como amônia pelas brânquias (DAN TATAGIBA *et al.*, 2022; PINHEIRO *et al.*, 2021). Além dos macronutrientes N e P, esses dejetos sólidos constituem fontes de outros nutrientes essenciais ao desenvolvimento vegetal (SANTOS *et al.*, 2018b). Assim, o resíduo desses sistemas é fonte potencial de macro e micronutrientes para as plantas e pode ser reutilizado como fertilizante, reduzindo impactos ambientais e valorizando subprodutos (STEINKE; SAITO, 2008; SANTOS *et al.*, 2018; PUTTI *et al.*, 2022).

O pintado (*Pseudoplatystoma corruscans*), bagre nativo das bacias dos rios São Francisco, Paraná e da Prata, destaca-se pelo elevado valor econômico na aquicultura brasileira (PEREIRA; FORESTI F; OLIVEIRA, 2009). Além de apresentar carne de alta qualidade, com ausência de espinhos intramusculares e perfil nutricional rico em proteínas e ácidos graxos ômega-3, é amplamente aceito pelo mercado consumidor (OKAMURA *et al.*, 2019; RODRIGUES *et al.*, 2017).

Dentre as culturas de relevância econômica, o tomateiro é reconhecido pela qualidade dos frutos e versatilidade na culinária. Considerado um alimento funcional é rico em compostos

bioativos, como vitaminas, fenóis e carotenoides, incluindo o licopeno, que atuam na prevenção de estresses oxidativos (CARVALHO *et al.*, 2006; COSTA *et al.*, 2018). Variedades de minitomates, como o tipo ‘grape’ (*S. lycopersicum* var. *cerasiforme*), têm ganhado preferência para consumo *in natura* pelo sabor adocicado, tamanho reduzido e alto valor de mercado (DANTAS *et al.*, 2021).

Estudos prévios investigaram o reúso da fração líquida (efluente) da piscicultura na fertirrigação de culturas como o tomate tipo ‘grape’ (DIATTA *et al.*, 2023; SÁ *et al.*, 2024). No entanto, SILVA *et al.* (2022) observaram que, embora a fertirrigação contínua com efluente de piscicultura não tenha afetado as trocas gasosas, ela comprometeu a produção final de frutos. De forma semelhante, PATTILLO *et al.* (2020) relataram que o uso de efluentes de sistemas de bioflocos em tomate resultou em produtividade comparável às práticas convencionais, porém com limitações associadas ao manejo nutricional.

Por outro lado, a utilização da fração sólida de resíduos aquícolas tem demonstrado resultados promissores. GRAVEL *et al.* (2014), evidenciaram que resíduos de tanques de trutas, quando incorporados ao solo, atuaram como condicionadores do solo, promoveram o crescimento vegetal e ainda suprimiram patógenos como *Pythium ultimum* e *Fusarium oxysporum*. Resultados semelhantes foram encontrados por SCHEMBRI *et al.* (2025), que verificaram que biossólidos de peixe podem substituir parcialmente fertilizantes comerciais em mudas de tomate, aumentando o teor de clorofila e o vigor das plantas. RACHMA *et al.* (2025) também demonstraram que fertilizantes orgânicos derivados de resíduos solúveis de peixe mantêm a produtividade e a qualidade de frutos de tomate em sistemas hidropônicos. Além disso, estudos em outras culturas, como *Stevia rebaudiana*, confirmam o potencial desses resíduos como biofertilizantes para promover crescimento e mitigar estresses abióticos (MAHDAVI *et al.*, 2024).

A fisiologia e o metabolismo das plantas estão diretamente relacionados às condições do meio de cultivo, envolvendo fatores bióticos e abióticos (PACHECO; LAZZARINI; ALVARENGA, 2021). A produtividade, a tolerância a estresses e a qualidade nutricional dos alimentos dependem da capacidade da planta de responder às variações ambientais, tanto pela eficiência na absorção de nutrientes quanto pela indução de alterações metabólicas. Tais respostas resultam na síntese de compostos associados à tolerância e à melhoria da qualidade nutricional e nutracêutica dos alimentos (AFONSO *et al.*, 2018). Nesse sentido, a literatura destaca a relevância da reciclagem de nutrientes em sistemas de cultivo protegido como alternativa sustentável para reduzir o uso de insumos minerais e ampliar a eficiência produtiva (ASADUZZAMAN *et al.*, 2022; SCHMAUTZ *et al.*, 2016).

Apesar do potencial evidente, a utilização da fração sólida de resíduos da piscicultura de peixes como o pintado (*P. corruscans*) ainda é pouco explorada. A investigação dos efeitos desse resíduo na composição de substratos para o tomateiro pode, portanto, preencher uma lacuna importante na literatura, fornecendo subsídios para o desenvolvimento de novos insumos sustentáveis, com benefícios ambientais, econômicos e sociais.

Diante do exposto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o potencial do resíduo sólido de tanques de cultivo do peixe pintado como fertilizante orgânico para o cultivo de tomate tipo ‘grape’, considerando as influências sobre as características fisiológicas, de crescimento e os componentes de produção.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Caracterização do local do experimento e delineamento experimental

O experimento foi conduzido em casa de vegetação climatizada no Laboratório de Ecofisiologia e Produtividade Vegetal do Instituto Federal Goiano (IF Goiano), Campus Rio Verde, GO, Brasil (17°48'18.33" S, 50°54'0.04" O; 748 m de altitude). As condições ambientais internas foram controladas, com temperatura média de 25°C e umidade relativa do ar de aproximadamente 60%. O período experimental ocorreu entre 6 de fevereiro de 2024 e 21 de junho de 2024, desde o transplântio das mudas até a colheita final.

O clima da região, de acordo com a classificação de Köppen-Geiger, é tropical úmido (Aw), caracterizado por inverno seco e verão chuvoso, com precipitação anual média entre 1.500 e 1.800 mm e temperaturas médias anuais entre 20 e 35°C (KOTTEK *et al.*, 2006).

O delineamento experimental foi inteiramente ao acaso (DIC), em arranjo fatorial, com cinco tratamentos e sete repetições, totalizando 35 unidades experimentais. Cada vaso (capacidade de 8 L), representando uma unidade experimental, foi preenchido com uma camada de 1 L de brita nº 1 para drenagem, coberta por manta geotêxtil para evitar a perda de substrato, e 6 L do substrato específico de cada tratamento, mantendo-se uma borda livre de 1 L para irrigação.

As plantas foram conduzidas em haste única e tutoradas verticalmente com fitilhos de ráfia e grampos plásticos. Para o monitoramento de insetos-praga, foram instaladas armadilhas adesivas amarelas ao nível do dossel das plantas. O manejo fitossanitário preventivo incluiu aplicações de produtos biológicos à base de *Beauveria bassiana*, além de fungicida tiofanato-metílico e inseticida Fenpropatrina, conforme recomendação para a cultura.

2.2 Obtenção, Preparo e Caracterização do Resíduo de Piscicultura

O resíduo foi obtido em outubro de 2023, a partir de um viveiro escavado em solo natural (sem revestimento), destinado à produção intensiva de pintado (*Pseudoplatystoma corruscans*), localizado no município de Itapirapuã, GO, Brasil. A estrutura possui área de espelho d'água de 1.926,71 m², com dimensões médias de 95,0 m de comprimento por 20,0 m de largura e lâmina d'água média de 1,8 m de profundidade, totalizando o volume estimado de 3.468 m³. O material, composto por excretas, sobras de ração e matéria orgânica decantada, foi coletado ao final de um ciclo de produção de 200 kg de peixes. Durante o ciclo, os animais receberam alimentação comercial com 40% de proteína bruta na fase inicial e 32% na fase de terminação.

Após a despesca e drenagem completa do viveiro, aguardaram-se 15 dias para secagem parcial do fundo, quando o resíduo foi coletado manualmente da camada superficial de 10 cm, utilizando pás e carrinhos higienizados. O material foi acondicionado em sacos de rafia e transportado para o Laboratório de Ecofisiologia e Produtividade Vegetal, IF Goiano, Rio Verde, GO, e foi disposto para secagem sobre lona plástica em galpão coberto e ventilado por 15 dias. Posteriormente, o resíduo seco foi processado em peneira e malha de 15 x 32 mm para uniformização das partículas. Uma amostra homogênea foi coletada para análise química, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Características químicas do resíduo sólido de piscicultura de pintado utilizado na composição dos tratamentos.

Parâmetro	Unidade	Valor
pH (em H ₂ O)	-	6,5
Matéria Orgânica (MO)	%	6,7
Umidade	%	3,8
Carbono Orgânico (C Org)	%	3,8
Nitrogênio Total (N)	%	0,1
Relação C/N	-	38
Fósforo (P ₂ O ₅)	%	0,13
Potássio (K ₂ O)	%	0,07
Cálcio (Ca)	%	0,04
Magnésio (Mg)	%	0,04
Enxofre (S)	%	0,02
Boro (B)	mg kg ⁻¹	6
Cobre (Cu)	mg kg ⁻¹	3

Ferro (Fe)	mg kg ⁻¹	3177
Manganês (Mn)	mg kg ⁻¹	27
Molibdênio (Mo)	mg kg ⁻¹	2
Zinco (Zn)	mg kg ⁻¹	31
Capacidade de troca catiônica (CTC)	cmol _c /kg ⁻¹	90

2.3 Preparo dos substratos e Tratamentos

O substrato controle foi formulado pela mistura de solo e areia grossa na proporção de 2:1 (v/v). O solo foi coletado na área experimental do IF Goiano, Campus Rio Verde, classificado como Latossolo Vermelho distroférico (LVdf) de textura argilosa. A areia grossa foi adquirida comercialmente. Ambos os materiais foram peneirados em malha de 5 mm antes da mistura. As características físico-químicas do substrato controle foram analisadas segundo a metodologia de MALAVOLTA, (1980) e estão descritas na Tabela 2.

Tabela 2 - Análise físico-química do substrato base, formulado com Latossolo Vermelho distroférico e areia (2:1, v/v), utilizado como tratamento controle e para a composição dos demais tratamentos.

Parâmetro	Unidade	Valor
Macronutrientes		
Fósforo (P-Mehlich)	mg dm ⁻³	1,7
Potássio (K)	mg dm ⁻³	20
Enxofre (S)	mg dm ⁻³	5
Sódio (Na)	mg dm ⁻³	7
Micronutrientes		
Boro (B)	mg dm ⁻³	0
Cobre (Cu)	mg dm ⁻³	0,9
Ferro (Fe)	mg dm ⁻³	74,7
Manganês (Mn)	mg dm ⁻³	7,9
Zinco (Zn)	mg dm ⁻³	1
Características de Fertilidade		
Matéria Orgânica (MO) %		2,6
SB	cmol _c dm ⁻³	0,9

CTC	cmol _c dm ⁻³	2,4
V%	%	38,8
P-rem	mg L ⁻¹	ND ⁴

Legenda: SB, Soma de Bases; CTC, capacidade de troca catiônica; V%, saturação por bases; P-rem, fósforo remanescente; ND, não detectado.

A saturação por bases do substrato foi elevada para 70% mediante a incorporação de calcário dolomítico comercial (PRNT 93%), aplicado na dose equivalente a 4,5 mg ha⁻¹. Após a aplicação, o substrato foi incubado por 30 dias com irrigação periódica, para garantir a reação do corretivo antes do transplante. Posteriormente, o substrato foi adubado no plantio, conforme recomendação para a cultura (Tabela 3).

Tabela 3 - Quantidade final de nutrientes (mg dm⁻³) em cada tratamento, compostos por substrato (solo + areia) e diferentes proporções de resíduo de pintado.

Nutrientes	Tratamentos				
	Controle	15% Resíduo	30% Resíduo	45% Resíduo	60% Resíduo
N	60,0 ¹	201	342	483	624
P	153,0 ¹	215,1	277,2	339,3	401,4
K	40,0 ¹	121,2	202,3	283,5	364,6
Ca	378,2	381,5	384,7	388	391,3
Mg	45	98,3	151,5	204,8	258
S	60	81	102	123	144
B	0,8	1,6	2,4	3,1	3,9
Cu	1,5	1,7	2	2,2	2,4
Fe	5	480,8	956,6	1432,4	1908,2
Mn	4	7,5	10,9	14,4	17,8
Mo	0,15	0,43	0,7	0,98	1,26
Zn	5	8,9	12,8	16,7	20,6

Legenda: ¹Valores da adubação nutricional no controle representam a dose por unidade experimental (vaso), considerando adubação de plantio e cobertura. Cálculo dos tratamentos: Considerou-se a redução proporcional da adubação química (ex: 15% de resíduo recebeu apenas 85% da adubação do controle) somada à contribuição nutricional do resíduo. Exigências nutricionais de referência: 60 mg dm⁻³ N, 153 mg dm⁻³ P, 40 mg dm⁻³ K, 45 mg dm⁻³ Mg, 60 mg dm⁻³ S, 0,8 mg dm⁻³ B, 1,5 mg dm⁻³ Cu, 5 mg dm⁻³ Fe, 4 mg dm⁻³ Mn, 0,15 mg dm⁻³ Mo e 5 mg dm⁻³ Zn.

O substrato foi então dividido e incorporado com o resíduo em diferentes proporções volumétricas para compor cinco tratamentos:

- T1 (Controle): 100% substrato padrão;
- T2 (15% Resíduo): 85% de substrato + 15% de resíduo;
- T3 (30% Resíduo): 70% de substrato + 30% de resíduo;
- T4 (45% Resíduo): 55% de substrato + 45% de resíduo;
- T5 (60% Resíduo): 40% de substrato + 60% de resíduo.

2.4 Preparo das Mudas e Transplântio

As sementes do tomateiro cv. Sweet Heaven, pertencente ao grupo *grape* de hábito de crescimento indeterminado, foram semeadas em bandejas de 50 células preenchidas com substrato comercial (Carolina Soil®, Santa Cruz do Sul, RS, Brasil). Após a irrigação prévia até a capacidade de vaso, depositou-se uma semente por célula, a 1 cm de profundidade. A irrigação foi realizada via microaspersores rotativos tipo bailarina, com vazão nominal de 76 L h⁻¹ sob pressão de serviço de aproximadamente 150 kPa (1,5 bar). O sistema, gerenciado por um controlador automático (Modelo BTT-101, Hunter Industries®, San Marcos, CA, EUA), foi programado para dois acionamentos diários (08h00 e 16h00), visando manter o substrato próximo à capacidade de campo. O transplântio para os vasos definitivos ocorreu aos 21 dias após a semeadura (DAS), quando as plantas apresentavam a terceira folha completamente expandida.

2.5 Condução do Experimento e Adubação de Cobertura

Todos os tratamentos receberam adubação de cobertura via fertirrigação, aplicada manualmente diretamente no substrato, na base de cada planta, em duas etapas (final do estágio vegetativo e início da frutificação). O tratamento Controle (T1) recebeu a dose completa (100%) recomendada para a cultura. Os demais tratamentos (T2 a T5) receberam uma dose de fertilizante química proporcional à quantidade de substrato padrão presente no vaso (Tabela 4), com o objetivo de avaliar a capacidade do resíduo em complementar a nutrição das plantas.

Tabela 4 - Quantidade total de sais e soluções aplicadas via fertirrigação de cobertura para cada tratamento.

Reagente	Unidade	Tratamentos				
		T1 (Controle)	T2 (15%)	T3 (30%)	T4 (45%)	T5 (60%)
MAP	g	22,89	19,46	16,02	12,59	9,16
KH ₂ PO ₄	g	5,88	4,99	4,11	3,23	2,35
MgSO ₄	g	3,5	2,98	2,45	1,93	1,4
CuSO ₄	g	0,22	0,19	0,15	0,12	0,09
ZnSO ₄	g	0,92	0,78	0,64	0,51	0,37
H ₃ BO ₃	mL	67,18	57,1	47,03	36,95	26,87
Fe-EDTA	mL	42	35,7	29,4	23,1	16,8
MnCl ₂	mL	45,51	38,68	31,86	25,03	18,2
H ₂ MoO ₄	mL	76	64,6	53,2	41,8	30,4

2.6 Variáveis fisiológicas

As avaliações fisiológicas (trocas gasosas e fluorescência da clorofila *a*) foram realizadas na terceira folha completamente expandida a partir do ápice, aos 50 e 78 dias, após o transplântio (DAT), correspondente aos estádios vegetativo e reprodutivo pleno, respectivamente. As trocas gasosas foram determinadas utilizando analisador de gás infravermelho (IRGA, modelo Li-6800xt, Li-cor, Nebraska, EUA), para obtenção da taxa fotossintética (A , $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), condutância estomática (g_s , $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$), taxa transpiratória (E , $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), e relação entre a concentração interna e externa de CO₂ (C_i/C_a). As avaliações foram realizadas entre 8h e 11h, sob densidade de fluxo de fótons fotossintéticos (PPFD; $1500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), concentração de CO₂ ($\sim 400 \mu\text{mol mol}^{-1}$) e temperatura ($\sim 25,5^\circ\text{C}$) constantes, e umidade relativa ($\sim 50\%$) ambiente.

A fluorescência da clorofila *a* foi avaliada pelo método transiente OJIP utilizando fluorômetro portátil (FluorPen FP 100, Instrumentos de sistemas de fótons, Drásov, República Checa). As folhas foram previamente adaptadas ao escuro por 30 minutos para oxidação completa do sistema de transporte de elétrons fotossintético. Após exposição ao pulso saturante de luz ($3000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), com comprimento de onda de 450 nm por 1 s, foram obtidos: eficiência quântica potencial do PSII (F_v/F_m); probabilidade de transporte de elétrons após a quinona A (Φ_{EO}); índice de desempenho fotossintético (PI_{ABS}); absorção de energia por centro de reação (ABS/RC); rendimento quântico de dissipação de energia (Φ_{DO}); fluxo de energia capturado por centro de reação (TR_O/RC); fluxo de transporte de elétrons por centro de reação (ET_O/RC); e fluxo de dissipação de energia por centro de reação (DI_O/RC).

Para mensuração dos índices de clorofila *a*, clorofila *b* e clorofilas totais (*a+b*), utilizou-se clorofilômetro portátil (CFL 1030, ClorofiLOG®, Falker Automação Agrícola, Porto Alegre, Brasil), que emite três comprimentos de onda ($\lambda = 635, 660$ e 880 nm) (FALKER, 2008). As leituras foram realizadas na mesma folha utilizada para trocas gasosas e fluorescência, evitando-se as nervuras.

2.7 Variáveis morfológicas

Aos 50 DAT e 78 DAT foram mensuradas as características morfológicas: altura da planta (AP, cm), com trena milimétrica, considerando a distância da base da planta ao ápice caulinar (OTONI *et al.*, 2012b), e o diâmetro do caule (DC, mm) utilizando paquímetro digital (precisão de 0,1 mm) no colo da planta.

2.8 Variáveis de produção

Para componentes produtivos, frutos maduros foram coletados durante duas semanas, contabilizados e pesados para determinação do número de frutos, massa total e massa média dos frutos por parcela. A massa média foi obtida pela razão entre a massa total e o número de frutos da parcela.

O teor de sólidos solúveis totais (°Brix) foi determinado com refratômetro manual (0-32%, Akso Medição, São Paulo, SP, Brasil) e expresso em graus Brix (°Brix).

Ao final do experimento, avaliaram altura da planta, diâmetro do caule e número de nós. Em seguida, folhas e colmos foram separados e secos em estufa de circulação forçada de ar a 65°C por 5 dias, para obtenção da massa seca das folhas (MSF) e massa seca dos colmos (MSC). A massa seca da parte aérea (MSPA) foi calculada pela soma de MSF e MSC.

2.9 Análises estatísticas

Os dados foram inicialmente submetidos aos testes de normalidade (Shapiro-Wilk) e homogeneidade de variâncias (Bartlett). As variáveis monitoradas ao longo do ciclo (trocas gasosas, fluorescência e morfologia) foram analisadas segundo o delineamento de parcelas subdivididas no tempo (*split-plot in time*). Neste arranjo, os tratamentos (doses de resíduo) constituíram as parcelas, enquanto os estádios de desenvolvimento (vegetativo e reprodutivo) representaram as subparcelas, considerando medidas repetidas nas mesmas unidades experimentais. A análise de variância (ANOVA) testou os efeitos dos fatores dose, estágio e da interação (teste F; $p < 0,05$). Na ausência de interação significativa, procedeu-se à análise dos efeitos principais de forma isolada, agrupando as repetições do fator não analisado, elevando o

número de observações (n) para 14 na análise de doses e 35 na análise de estádios, aumentando a precisão das estimativas. Quando a interação foi significativa, realizou-se o desdobramento da interação e a comparação de médias pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$). Para as variáveis mensuradas apenas ao final do ciclo (produção e biomassa), aplicou-se ANOVA para o efeito das doses. Modelos de regressão polinomial foram ajustados para o fator dose quando significativo. Todas as análises foram realizadas no software R (versão 4.3.2), utilizando o pacote ExpDes.pt.

3. RESULTADOS

3.1. Análise de variância geral

A ANOVA demonstrou que o estágio de desenvolvimento afetou significativamente a maioria das variáveis fisiológicas avaliadas. A interação dose $\times$ estágio foi significativa para a taxa fotossintética (A) e a altura da planta (AP), indicando que o efeito das doses sobre essas variáveis depende do estágio fenológico. A dose do resíduo influenciou variáveis como a condutância estomática (g_s), a transpiração (E) e a eficiência potencial do PSII (F_v/F_m). (Tabela 5).

Tabela 5 - Resumo da análise de variância (ANOVA) para as variáveis fisiológicas e morfológicas do tomateiro cv. Sweet Heaven cultivadas com diferentes doses de resíduo, avaliadas em dois estádios fenológicos.

Variável	p-valor Dose	p-valor Estádio	p-valor Interação	CV 1 (%)	CV 2 (%)
A	0,0037 **	<0,001 ***	0,0012 **	14,55	12,67
g_s	0,0023 **	<0,001 ***	0,5706 ns	27,41	30,88
E	0,0010 **	<0,001 ***	0,2985 ns	16,81	16,83
Ci/Ca	0,0680 ns	0,9306 ns	0,5294 ns	2,97	2,38
F_v/F_m	0,0165 *	<0,001 ***	0,0880 ns	3,02	3,14
Φ_{EO}	0,8564 ns	0,0041 **	0,6907 ns	14,52	14,9
PI_{ABS}	0,8609 ns	<0,001 ***	0,6332 ns	46,87	40,65
ABS/RC	0,0286 *	<0,001 ***	0,1990 ns	7,36	6,26
$TRORC$	0,2808 ns	<0,001 ***	0,6800 ns	5,67	3,56
ET_{ORC}	0,3702 ns	0,5973 ns	0,8457 ns	11,84	13,29
$DIORC$	0,0077 **	<0,001 ***	0,0753 ns	16,08	16,68

ΦDO	0,0166 *	<0,001 ***	0,0882 ns	9,24	9,61
Altura	0,7514 ns	<0,001 ***	0,0006 ***	26,87	4,01
Diâmetro	0,5281 ns	<0,001 ***	0,7207 ns	16,16	12
Clorofila <i>a</i>	0,9289 ns	0,5479 ns	0,2748 ns	7,72	6,85
Clorofila <i>b</i>	0,5431 ns	0,0756 ns	0,2063 ns	22,93	19,26
Clorofila <i>a+b</i>	0,7156 ns	0,1974 ns	0,2550 ns	10,86	9,43

Legenda: *A*: taxa fotossintética; *g_s*: condutância estomática; *E*: transpiração; *C_i/C_a*: razão entre a concentração de CO₂ intercelular e a do ambiente; *F_v/F_m*: eficiência quântica potencial do PSII; ΦEO : probabilidade de um éxciton mover um elétron pela cadeia transportadora de elétrons; PIABS: índice de performance para absorção de energia; *ABS/RC*: absorção de energia por centro de reação; *TRORC*: fluxo de energia preso por centro de reação; *ET_oRC*: fluxo de transporte de elétrons por centro de reação; *DIORC*: fluxo de energia dissipada por centro de reação; ΦDO : rendimento quântico de dissipação de energia. CV 1 (%): Coeficiente de Variação da parcela. CV 2 (%): Coeficiente de Variação da subparcela. ns: não significativo; *, **, ***: significativo a 5%, 1% e 0,1% de probabilidade de erro, respectivamente, pelo teste F.

3.2. Interação dose × estágio nas variáveis com interação significativa

A resposta da taxa fotossintética (*A*) à aplicação do resíduo foi dependente do estágio fenológico da cultura. No estágio vegetativo, as doses de 15% e 30% de resíduo promoveram os maiores valores de *A*. Em contrapartida, no estágio reprodutivo, o tratamento controle apresentou a maior média em comparação aos tratamentos com o resíduo (Tabela 6).

Para a variável altura de planta, o efeito das doses de resíduo variou, conforme o estágio fenológico. Não houve diferença significativa entre os tratamentos no estágio vegetativo ($p > 0,05$). Entretanto, o efeito foi significativo no estágio reprodutivo ($p < 0,05$).

Tabela 6 - Desdobramento da interação entre doses de resíduo e estádios fenológicos para a taxa fotossintética (*A*) e altura do tomateiro cv. Sweet Heaven.

Variável	Desdobramento	Estádio	Nível (%)	Média	Scott-Knott
<i>A</i>	Doses no Estádio	Vegetativo	0	23,58	b
			15	27,63	a
			30	27,21	a
			45	22,37	b

			60	24,13	b
			0	23,19	a
			15	18,63	b
		Reprodutivo	30	17,56	b
			45	14,51	c
			60	17,99	b
Estádios na Dose		Vegetativo	0	23,58	a
		Reprodutivo	0	23,19	a
		Vegetativo	15	27,63	a
		Reprodutivo	15	18,63	b
		Vegetativo	30	27,21	a
		Reprodutivo	30	17,56	b
		Vegetativo	45	22,37	a
		Reprodutivo	45	14,51	b
		Vegetativo	60	24,13	a
		Reprodutivo	60	17,99	b
			0	192,57	a
			15%	181,33	a
Altura	Doses no Estádio	Reprodutivo	45	179,83	a
			60	176,33	a
			30	173,57	a
		Vegetativo	---	ns	---
		Vegetativo	0	145,71	b
		Reprodutivo	0	192,57	a
		Vegetativo	15	134,43	b
		Reprodutivo	15	181,33	a
		Vegetativo	30	144,50	b
		Reprodutivo	30	173,57	a
		Vegetativo	45	129,29	b

Reprodutivo	45	179,83	a
Vegetativo	60	124,29	b
Reprodutivo	60	176,33	a

Legenda: Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de agrupamento Scott-Knott ($p < 0,05$). Letras minúsculas comparam as doses em cada estágio; letras maiúsculas comparam os estágios em cada dose. ns: não significativo.

3.3. Efeito principal das doses de resíduo

Para as variáveis sem interação significativa, doses de até 30% formaram grupo com valores mais elevados de taxa transpiratória (E) e condutância estomática (g_s), enquanto doses maiores (45% e 60%) apresentaram valores inferiores (Tabela 7). Para a eficiência quântica potencial do PSII (F_v/F_m), os tratamentos 0% e 30% foram superiores aos demais. As variáveis ABS/RC , DIO/RC e ΦDO , relacionadas à dissipação de energia, aumentaram com o incremento das doses de resíduo.

Tabela 7 – Efeito principal das diferentes doses de resíduo sobre variáveis fisiológicas do tomateiro cv. Sweet Heaven.

Variável	Dose	Média	Erro Padrão	Scott-Knott
g_s	0%	1,16	0,0958	a
	15%	1,19	0,0847	a
	30%	1,01	0,11	a
	45%	0,8	0,103	b
	60%	0,86	0,0755	b
E	0%	13,4	0,672	a
	15%	13,84	0,693	a
	30%	12,29	0,889	a
	45%	10,5	0,913	b
	60%	11,25	0,685	b
F_v/F_m	0%	0,768	0,00768	a
	15%	0,753	0,00807	b
	30%	0,76	0,0072	a
	45%	0,75	0,011	b
	60%	0,737	0,0141	b

	0%	2,59	0,0548	b
	15%	2,7	0,0668	b
<i>ABS/RC</i>	30%	2,66	0,0518	b
	45%	2,77	0,0823	a
	60%	2,84	0,0995	a
	0%	0,605	0,0298	b
	15%	0,671	0,0391	b
<i>DI_O/RC</i>	30%	0,642	0,029	b
	45%	0,705	0,0514	a
	60%	0,765	0,0698	a
	0%	0,232	0,00766	b
	15%	0,247	0,00807	a
Φ DO	30%	0,24	0,0072	b
	45%	0,25	0,011	a
	60%	0,263	0,0141	a

Legenda: g_s : condutância estomática; E : transpiração; F_v/F_m : eficiência quântica potencial do PSII; *ABS/RC*: absorção de energia por centro de reação; *DI_O/RC*: fluxo de energia dissipada por centro de reação; Φ DO: rendimento quântico de dissipação de energia. Médias seguidas pela mesma letra na coluna, para cada variável, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de agrupamento Scott-Knott ($p < 0,05$).

3.4. Efeito do estágio fenológico

O estágio vegetativo apresentou maiores médias para g_s , E , F_v/F_m , Φ EO, PI_{ABS} e diâmetro do caule, enquanto o estágio reprodutivo apresentou maiores valores para *ABS/RC*, *TR_O/RC*, *DI_O/RC* e Φ DO, evidenciando mudanças no metabolismo da planta ao longo do ciclo (Tabela 8).

Tabela 8 - Efeito principal do estágio de desenvolvimento (vegetativo e reprodutivo) sobre as características fisiológicas e morfológicas do tomateiro cv. Sweet Heaven.

Variável	Estádio	Média	Erro Padrão	Scott-Knott
E	Veg	14,04	0,4	a
	Repr	10,4	0,438	b
g_s	Veg	1,18	0,0602	a

	Repr	0,83	0,0524	b
F_v/F_m	Veg	0,778	0,00319	a
	Repr	0,728	0,00575	b
Φ_{EO}	Veg	0,464	0,0111	a
	Repr	0,413	0,0105	b
PI_{ABS}	Veg	2,29	0,159	a
	Repr	1,36	0,106	b
ABS/RC	Repr	2,89	0,0433	a
	Veg	2,54	0,0276	b
TR_o/RC	Repr	2,1	0,0185	a
	Veg	1,97	0,0161	b
DI_o/RC	Repr	0,794	0,0291	a
	Veg	0,566	0,0135	b
Φ_{DO}	Repr	0,272	0,00575	a
	Veg	0,222	0,00319	b
DC	Veg	0,888	0,021	a
	Repr	0,778	0,0199	b

Legenda: E : transpiração; g_s : condutância estomática; F_v/F_m : eficiência quântica potencial do PSII; Φ_{EO} : probabilidade de um éxciton mover um elétron pela cadeia transportadora de elétrons; PI_{ABS} : índice de performance para absorção de energia; ABS/RC : absorção de energia por centro de reação; TR_o/RC : fluxo de energia preso por centro de reação; DI_o/RC : fluxo de energia dissipada por centro de reação; Φ_{DO} : rendimento quântico de dissipação de energia; DC: diâmetro do caule. Veg: Estádio vegetativo; Repr: Estádio reprodutivo. Médias seguidas por letras distintas na coluna, para cada variável, diferem estatisticamente entre si pelo teste de agrupamento Scott-Knott ($p < 0,05$).

3.5. Variáveis não influenciadas pelos tratamentos

Variáveis como a relação Ci/Ca , o transporte de elétrons (TR_o/RC , ET_o/RC), o diâmetro do caule e os teores de clorofila não foram influenciadas pela dose do resíduo nem pelo estágio de desenvolvimento (Tabela 9).

Tabela 9 - Valores médios e p -valores para as variáveis fisiológicas e morfológicas do tomateiro cv. Sweet Heaven que não foram significativamente influenciadas pelos fatores Dose e Estádio.

Fator	Variável	Médias	p-valor
Dose	<i>Ci/Ca</i>	0,855 - 0,881	0,0680 ns
	<i>TR_O/RC</i>	1,988 - 2,076	0,2808 ns
	<i>ET_ORC</i>	1,131 - 1,236	0,3702 ns
	DC	0,793 - 0,869	0,5281 ns
	Clorofila <i>a</i>	36,61 - 37,55	0,9289 ns
	Clorofila <i>b</i>	12,22 - 14,07	0,5431 ns
	Clorofila <i>a+b</i>	48,84 - 51,51	0,7156 ns
Estádio	<i>Ci/Ca</i>	0,866 - 0,867	0,9306 ns
	<i>ET_ORC</i>	1,170 - 1,189	0,5973 ns
	Clorofila <i>a</i>	36,87 - 37,27	0,5479 ns
	Clorofila <i>b</i>	12,71 - 13,91	0,0756 ns
	Clorofila <i>a+b</i>	49,58 - 51,18	0,1974 ns

Legenda: *Ci/Ca*: razão entre a concentração de CO₂ intercelular e a do ambiente; *TR_ORC*: fluxo de energia preso por centro de reação; *ET_ORC*: fluxo de transporte de elétrons por centro de reação. ns: não significativo ($p > 0,05$) pelo teste F da ANOVA.

3.6. Crescimento, biomassa e componentes de produção

Os parâmetros de crescimento e biomassa (altura, diâmetro do caule e massa seca) não apresentaram diferença estatística entre os tratamentos. No entanto, o número e a massa total de frutos foram significativamente afetados pela dose do resíduo (Tabela 10).

Tabela 10 – Resumo da Análise de Variância (ANOVA) para as variáveis de crescimento, biomassa e produção do tomateiro cv. Sweet Heaven cultivado em substrato com diferentes doses de resíduo de pintado.

Variável	p-valor	CV (%)
Número de nós	0,6514 ns	16,74
Altura de planta	0,9644 ns	14,91
Diâmetro do caule	0,2506 ns	8,88
Massa seca de folhas	0,3903 ns	28,29
Massa seca do caule	0,1127 ns	14,92

Massa seca da parte aérea	0,2177 ns	16,95
Sólidos Solúveis Totais	0,3121 ns	15,45
Número de frutos	0,0178 *	23,37
Massa total de frutos	0,0210 *	20,26
Massa média de frutos	0,0909 ns	16,98

Legenda: ns: não significativo; *: significativo, pelo teste F ($p < 0,05$). CV (%): Coeficiente de variação em porcentagem. As variáveis de crescimento (número de nós, altura da planta, diâmetro do caule) e biomassa foram avaliadas no início do estágio de frutificação.

O maior número de frutos foi observado no controle, seguido pelos tratamentos com 30%, 45% e 60% de resíduo, que não diferiram estatisticamente entre si. O menor número foi no tratamento com 15% de resíduo, que também apresentou menor a massa total de frutos. O controle e o tratamento com 60% apresentaram as maiores massas totais, sendo estatisticamente semelhantes (Tabela 11).

Tabela 11 - Médias de número de frutos e massa total de frutos (g) do tomateiro cv. Sweet Heaven submetido a diferentes doses de resíduo de piscicultura.

Variável	Dose	Média	Scott-Knott
Número de Frutos	0%	19,71	a
	15%	12,29	b
	30%	17,29	ab
	45%	18,00	ab
	60%	16,29	ab
Massa total de frutos	0%	201,91	a
	15%	139,50	b
	30%	191,27	ab
	45%	191,91	ab
	60%	202,01	a

Legenda: Médias seguidas pela mesma letra na coluna, para cada variável, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de agrupamento Scott-Knott a 5% de probabilidade de erro ($p > 0,05$). Os dados de massa total de frutos estão expressos em gramas (g).

4. DISCUSSÃO

A crescente demanda por práticas agrícolas sustentáveis estimula a busca por alternativas aos fertilizantes minerais convencionais, visando reduzir custos, minimizar impactos ambientais e promover o reaproveitamento de resíduos agroindustriais. Este estudo avaliou o potencial do resíduo sólido do pintado como substituto parcial da adubação química na produção de tomate cv. Sweet Heaven. Os resultados indicam que o resíduo apresenta potencial promissor, embora seu efeito dependa da dose aplicada e do estágio fenológico da cultura, considerando a relação entre a disponibilidade gradual de nutrientes e as necessidades fisiológicas da planta.

4.1. Resposta Fotossintética

O principal achado deste trabalho foi a interação significativa entre as doses do resíduo e os estádios fenológicos na taxa fotossintética. Na fase vegetativa, doses intermediárias (15% e 30%) promoveram as maiores taxas de assimilação de CO₂, superando inclusive o tratamento controle com adubação química. Esse comportamento sugere que o resíduo contribui positivamente para o estabelecimento da planta, possivelmente por melhorar a qualidade física do substrato, aumentando a aeração, a capacidade de retenção hídrica e o fornecimento geral de nutrientes, beneficiando a atividade fotossintética (TAO *et al.*, 2024; DIATTA *et al.*, 2023). O uso de efluentes salino proveniente do cultivo de tilápias demonstrou impactos neutros a positivos na taxa fotossintética e crescimento do tomateiro do cultivar de *Samambaia* (Silva *et al.*, 2022).

No entanto, na fase reprodutiva, o controle químico apresentou a maior taxa fotossintética, enquanto os tratamentos com resíduo apresentaram redução nessa variável. Isso sugere que a intensa demanda metabólica intensa para o enchimento dos frutos pode não ter sido plenamente atendida pela taxa de mineralização do resíduo, que atua como fertilizante de liberação lenta (JIANG *et al.*, 2024). A disponibilidade rápida e equilibrada dos nutrientes na adubação química pode suprir melhor essa demanda de pico. A diminuição da fotossíntese em doses elevadas nessa fase pode indicar ajuste na relação fonte-dreno, com a planta direcionando recursos ao desenvolvimento dos frutos em detrimento da manutenção da atividade fotossintética foliar (DIATTA *et al.*, 2023; ZHAO *et al.*, 2024).

O estado nutricional, correlacionado com a eficiência fotossintética, é impactado pela dinâmica da absorção de nutrientes e pelo estágio de desenvolvimento da planta, conforme também evidenciado por PAN *et al.* (2017).

4.2. Efeitos fisiológicos da dose

A análise isolada das doses revelou tendência de redução na condutância estomática e na transpiração com o aumento da concentração do resíduo, sugerindo indução de estresse osmótico ou desequilíbrio nutricional em doses mais elevadas (45% e 60%). O excesso de íons na solução do solo pode dificultar a absorção de água, levando ao fechamento parcial dos estômatos como mecanismo de defesa (XUE *et al.*, 2021). Essa limitação potencial causada por altas doses do resíduo destaca a necessidade de balancear a incorporação ao substrato para evitar impactos negativos à planta. Paralelamente, variáveis relacionadas à dissipação de energia (ABS/RC , DI_o/RC , ΦDO) aumentaram com a dose, indicando a ativação de mecanismos fotoprotetores para dissipar o excesso de energia luminosa não utilizada na A , caracterizando sinal de estresse fisiológico (CHEN *et al.*, 2024). Importante destacar que, apesar desses indícios, não foram observados sintomas visuais evidentes de toxicidade, podendo indicar tolerância ao estresse induzido.

Estudos similares com compostos orgânicos e biofertilizantes ressaltam o papel desses insumos na modulação da resposta a estresses abióticos, incluindo a salinidade e restrições nutricionais. Ao avaliarem o uso de compostos orgânicos associados a bioestimulantes na cultura da fava (*Vicia faba*) sob irrigação salina em solo arenoso foi observado que o insumo mitigou os efeitos adversos do estresse, promovendo o aumento da produtividade e a manutenção dos teores de proteína nas sementes (ABBAS *et al.*, 2022). A aplicação de fertilizante orgânico associado ao silício em plantas de tomateiro, submetidas ao estresse pela redução de adubação nitrogenada, resultou na melhoria das propriedades do solo, refletindo no aumento do rendimento e da qualidade dos frutos (ZHANG *et al.*, 2024).

4.3. Fisiologia e produção final de frutos

As variáveis de produção apresentaram resposta complexa ao uso do resíduo. O tratamento com 15% de resíduo, apesar da boa performance fotossintética na fase vegetativa, resultou no menor número e massa total dos frutos. Isso indica que a liberação nutricional foi insuficiente para atender à demanda da fase reprodutiva, limitando a produtividade final. No entanto, a complementação com adubação química de cobertura poderia suprir essas necessidades (GAO *et al.*, 2023). Os autores sugerem que práticas que aumentam a exploração da matéria orgânica incorporada ao solo como fonte de fertilizante de tomate em estufa, podem prevenir deficiências nos estágios finais de cultivo e melhorar a produtividade (GAO *et al.*, 2023).

Por outro lado, o tratamento com 60% de resíduo, que demonstrou indícios de estresse fisiológico ao longo do ciclo, obteve produtividade semelhante ao controle, sugerindo que a alta carga de nutrientes presente nessa dose foi suficiente para sustentar o desenvolvimento dos frutos, apesar dos compromissos fisiológicos (RACHMA *et al.*, 2025). Esses resultados indicam que doses baixas de resíduo são fisiologicamente seguras, porém podem ser nutricionalmente insuficientes para altas produtividades, enquanto doses elevadas podem intensificar o estresse, impactando o metabolismo e, potencialmente, a saúde da planta a longo prazo.

Outros estudos destacam a importância do manejo integrado de compostos orgânicos, biofertilizantes e fertilizantes químicos para manter a produtividade e a qualidade das culturas. A substituição parcial da adubação mineral por compostos de resíduos orgânicos provoca melhorias significativas nas propriedades físico-químicas e biológicas do solo, o que impulsionou o rendimento produtivo da cultura (AL-SUHAIBANI *et al.*, 2020). A integração de biofertilizantes otimizam a disponibilidade de nutrientes e a resposta fisiológica das plantas a estresses abióticos, resultando em maior acúmulo de biomassa (KUMAR *et al.*, 2022). O uso combinado de bioestimulantes à fertilização convencional no cultivo de trigo manteve a produtividade e a qualidade nutricional da planta nos mesmos patamares do manejo estritamente químico (FASANI *et al.*, 2025).

5. Conclusão

Os resultados obtidos permitem inferir que o resíduo sólido proveniente de viveiros de pintado apresenta potencial agrônomo para a substituição parcial da fertilização mineral no cultivo do tomateiro cv. Sweet Heaven.

Os dados sugerem que a incorporação do resíduo em doses moderadas (próximas a 30%) pode favorecer o desempenho fisiológico da planta, especialmente a taxa fotossintética na fase vegetativa, além de promover melhorias na qualidade dos frutos, evidenciada pelo aumento no teor de sólidos solúveis. Por outro lado, a utilização de doses mais elevadas (até 60%), embora tenha mantido a produtividade em patamares estatisticamente semelhantes ao controle mineral, aparenta impor um custo fisiológico às plantas, possivelmente associado ao desequilíbrio osmótico ou nutricional.

Desta forma, o manejo nutricional integrado, associando a fonte orgânica à complementação mineral, demonstra ser uma prática promissora. Essa abordagem tende a conciliar a destinação sustentável do passivo ambiental da piscicultura com a manutenção dos índices produtivos e a melhoria qualitativa dos frutos.

Recomenda-se a investigação dos efeitos deste manejo a longo prazo na saúde e microbiologia do solo, bem como a avaliação da eficácia em diferentes cultivares de tomateiro, explorando o potencial máximo desta valiosa ferramenta da economia circular.

6. Referências Bibliográficas

- ABBAS, M. S.; BADAWY, R. A.; ABDEL-LATTIF, H. M.; EL-SHABRAWI, H. M. Synergistic effect of organic amendments and biostimulants on faba bean grown under sandy soil conditions. *Scientia Agricola*, v. 79, n. 3, 2022.
- AFONSO, M. V.; PARANHOS, J. T.; TABALDI, L. A.; SORIANI, H. H. In vitro seed germination and morphophysiological parameters of *Tabernaemontana catharinensis* A. DC. microcuttings. *Iheringia - Serie Botanica*, v. 73, n. 1, p. 39–45, 2018.
- AL-SUHAIBANI, N.; SELIM, M.; ALDERFASI, A.; EL-HENDAWY, S.; SELIM, M. Comparative performance of integrated nutrient management between composted agricultural wastes, chemical fertilizers, and biofertilizers in improving soil quantitative and qualitative properties and crop yields under arid conditions. *Agronomy*, v. 10, n. 10, 1 out. 2020.
- ASADUZZAMAN, M.; NIU, G.; ASAO, T. Editorial: Nutrients Recycling in Hydroponics: Opportunities and Challenges Toward Sustainable Crop Production Under Controlled Environment Agriculture. *Frontiers in Plant Science*. Frontiers Media S.A., 14 mar. 2022.
- BORGES, F. de F.; ANTONIO JARDIM, C.; CAMILOTI, F.; ALVES JULIÃO, F. Viabilidade Técnica De Um Sistema Aquapônico Para Produção De Forragem Animal. *Ciência & Tecnologia*, v. 13, n. 1, p. 178–189, 2021.
- CARVALHO, P. G. B. de; MACHADO, C. M. M.; MORETTI, C. L.; FONSECA, M. E. de N. Hortaliças como alimentos funcionais. *Horticultura Brasileira*, v. 24, n. 4, p. 397–404, 2006.
- CHEN, S.; ZHENG, Q.; QI, Z.; DING, J.; SONG, X.; XIA, X. Stress-induced delay of the I-P rise of the fast chlorophyll a fluorescence transient in tomato. *Scientia Horticulturae*, v. 326, 15 fev. 2024.
- COSTA, E. S. P.; SANTOS, C. A. dos; ROCHA, M. C.; CARMO, M. G. F. do. Caracterização física, físico-química e morfoagronômica de acessos de tomate cereja sob cultivo orgânico. *Revista de Ciências Agrárias*, v. 61, p. 1–8, 2018.
- COSTANTINI, M.; ZOLI, M.; CERUTI, M.; CRUDELE, R.; GUARINO, M.; BACENETTI, J. Environmental effect of improved forage fertilization practices in the beef production chain. *Science of the Total Environment*, v. 902, 1 dez. 2023.
- DANTAS, L. O.; MAIA, A. G.; MORENO, M. N.; MELO, N. G. M.; SOUZA, R. P. de; SOUZA, R. Á. T. de; MARTIM, S. R. Análise físico-química e microbiológica de tomates cereja

- (*Solanum lycopersicum* var. *cesariforme*) comercializados em empórios de Manaus-AM. Research, Society and Development, v. 10, n. 15, p. e527101523276, 2021.
- DAN TATAGIBA, S.; DA SILVA, S. S.; CARDOSO, T. A.; DA COSTA, M. H. P.; AGUIAR, R. L. de. Qualidade limnológica da água em ambiente de criação de tambaqui em tanques-rede no reservatório da Usina Hidrelétrica de Tucuruí. Scientific Electronic Archives, v. 15, n. 2, 2022.
- DIATTA, A. A.; MANGA, A. G. B.; BASSÈNE, C.; MBOW, C.; BATTAGLIA, M.; SAMBOU, M.; BABUR, E.; USLU, Ö. S. Sustainable Production of Tomato Using Fish Effluents Improved Plant Growth, Yield Components, and Yield in Northern Senegal. Agronomy, v. 13, n. 11, 1 nov. 2023.
- FALKER. Medidor Eletrônico de Teor de Clorofilajul. 2018.
- FASANI, E.; FRANCESCHI, C.; FURINI, A.; DALCORSO, G. Effect of biostimulants combined with fertilization on yield and nutritional value of wheat crops. BMC Plant Biology, v. 25, n. 1, 1 dez. 2025.
- GAO, F.; LI, H.; MU, X.; GAO, H.; ZHANG, Y.; LI, R.; CAO, K.; YE, L. Effects of Organic Fertilizer Application on Tomato Yield and Quality: A Meta-AnalysisApplied Sciences (Switzerland) MDPI, 1 fev. 2023.
- GRAVEL, V.; DORAIS, M.; DEY, D.; VANDENBERG, G. Fish effluents promote root growth and suppress fungal diseases in tomato transplants. Canadian Journal of Plant Science, v. 95, n. 2, p. 427–436, 4 mar. 2014.
- JIANG, Z.; CHEN, Q.; LIU, D.; TAO, W.; GAO, S.; LI, J.; LIN, C.; ZHU, M.; DING, Y.; LI, W.; LI, G.; SAKR, S.; XUE, L. Application of slow-controlled release fertilizer coordinates the carbon flow in carbon-nitrogen metabolism to effect rice quality. BMC Plant Biology, v. 24, n. 1, 1 dez. 2024.
- KOTTEK, M.; GRIESER, J.; BECK, C.; RUDOLF, B.; RUBEL, F. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. Meteorologische Zeitschrift, v. 15, n. 3, p. 259–263, 2006.
- KUMAR, S.; DIKSHA; SINDHU, S. S.; KUMAR, R. Biofertilizers: An ecofriendly technology for nutrient recycling and environmental sustainabilityCurrent Research in Microbial SciencesElsevier Ltd, 1 jan. 2022.
- MAHDAVI, Z.; ESMAILPOUR, B.; AZARMI, R.; PANAHIRAD, S.; NTATSI, G.; GOHARI, G.; FOTOPOULOS, V. Fish Waste—A Novel Bio-Fertilizer for Stevia (*Stevia rebaudiana* Bertoni) under Salinity-Induced Stress. Plants, v. 13, n. 14, p. 1909, 11 jul. 2024.
- MALAVOLTA, E. Elementos de nutrição mineral de plantas. [s.l: s.n.]1–251 p.

- MERCANTE, C. T. J.; CARMO, C. F. do; OSTI, J. A. S. Issn 1981-741x. Revista Geociências UNG-Ser, v. 19, n. 2, p. 59–68, 2020.
- OKAMURA, D.; FORTES-SILVA, R.; PAULINO, R. R.; DE ARAÚJO, F. G.; DA COSTA, D. V.; PEREIRA, R. T.; ROSA, P. V. Metabolic responses to dietary carbohydrate/lipids ratios in neotropical hybrid catfish (*pseudoplatystoma corruscans* × *pseudoplatystoma fasciatum*). Anais da Academia Brasileira de Ciências, v. 91, n. 4, 2019.
- OTONI, B. da S.; MOTA, W. F. da; BELFORT, G. R.; SILVA, A. R. S.; VIEIRA, J. C. B.; ROCHA, L. de S. Produção de híbridos de tomateiro cultivados sob diferentes porcentagens de sombreamento. Revista Ceres, v. 59, n. 6, p. 816–825, nov. 2012.
- PACHECO, F. V.; LAZZARINI, L. E. S.; ALVARENGA, I. C. METABOLISMO RELACIONADO COM A FISIOLOGIA DOS ESTÔMATOS. ENCICLOPÉDIA BIOSFERA, v. 18, n. 36, p. 186–206, 2021.
- PAN, Y.; LU, Z.; LU, J.; LI, X.; CONG, R.; REN, T. Effects of low sink demand on leaf photosynthesis under potassium deficiency. Plant Physiology and Biochemistry, v. 113, p. 110–121, 1 abr. 2017.
- PATTILLO, D. A.; FOSHEE, W. G.; BLYTHE, E. K.; PICKENS, J.; WELLS, D.; MONDAY, T. A.; HANSON, T. R. Performance of aquaculture effluent for tomato production in outdoor raised beds. HortTechnology, v. 30, n. 5, p. 624–631, 1 out. 2020.
- PEREIRA, C. da S. P.; RODRIGUES, M. O. S.; BARROS, C. L. dos S.; ALMEIDA, B. L. N. de; DIOGO, M. L. S. de A. D. Identificação de impactos ambientais provocados pelo lançamento de resíduos sólidos e líquidos no Rio Itapecuru. Nature and Conservation, v. 13, n. 2, p. 58–66, 2020.
- PEREIRA, L. H. G.; FORESTI F; OLIVEIRA, C. Genetic structure of the migratory catfish *Pseudoplatystoma corruscans* (Siluriformes: Pimelodidae) suggests homing behaviour. Ecology of Freshwater Fish, v. 18, n. 2, p. 215–225, jun. 2009.
- PINHEIRO, L. S. M.; DORCE, L. S.; ZIEMNICZAK, H. M.; NEU, D. H. Toxicidade aguda da amônia em pacu (*Piaractus mesopotamicus*). Revista Acadêmica Ciência Animal, v. 19, p. 1, 2021.
- PUTTI, F. F.; NOGUEIRA, B. B.; VACARO DE SOUZA, A.; FESTOZO VICENTE, E.; ZANETTI, W. A. L.; DE LUCCA SARTORI, D.; PIGATTO DE QUEIROZ BARCELOS, J. Productive and Physico-Chemical Parameters of Tomato Fruits Submitted to Fertigation Doses with Water Treated with Very Low-Frequency Electromagnetic Resonance Fields. Plants, v. 11, n. 12, 1 jun. 2022.

- RACHMA, D. F.; MAEDA, K.; YAMANOUCHI, Y.; UEDA, H.; SHINOHARA, M.; AHN, D. H. Tomato Production with Organic Fertilizer from Soluble Bonito Fish Waste in Hydroponic Cultivation Systems. *Horticulturae*, v. 11, n. 4, 1 abr. 2025.
- R CORE TEAM. R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>, 2024.
- RODRIGUES, B. L.; CANTO, A. C. V. D. C. S.; DA COSTA, M. P.; DA SILVA, F. A.; MÁRSICO, E. T.; CONTE, C. A. Fatty acid profiles of five farmed Brazilian freshwater fish species from different families. *PLoS ONE*, v. 12, n. 6, 1 jun. 2017.
- SÁ, F. V. da S.; TORRES, S. B.; OLIVEIRA, F. das C. de; SANTOS, A. S. dos; SOUZA, A. A. T.; PEREIRA, K. T. O.; PEIXOTO, T. D. C.; SILVA, L. de A.; MOREIRA, R. C. L.; PAIVA, E. P. de; ALMEIDA, H. A. de; MELO, A. S. de; FERREIRA NETO, M.; FERNANDES, P. D.; DIAS, N. da S. Ecophysiology of Soursop Seedlings Irrigated with Fish Farming Effluent under NPK Doses. *Sustainability (Switzerland)*, v. 16, n. 11, 1 jun. 2024.
- SAMPAIO, R. M.; FREDO, C. E. Características socioeconômicas e tecnologias na agricultura: um estudo da produção paulista de amendoim a partir do Levantamento das Unidades de Produção Agropecuária (LUPA) 2016/17. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, v. 59, n. 4, p. 1–15, 2021.
- SANTOS, J. T.; GUIMARÃES, J. C. S.; FRANCO, A.; CORDEIRO, J.; ALVARENGA, C.; SANTOS, C. I. F. dos; THEREZO, P. Resíduos Sólidos Orgânicos: Uma Análise Cienciométrica Acerca da Utilização da Compostagem Para a Geração de Adubo. *Research, Society and Development*, v. 7, n. 12, p. e14712498, 2018.
- SCHEMBRI, C.; KACZMAR, N.; OSBORN, J.; TIMMONS, M. B.; MATTSON, N. S. Evaluation of Fish Biosolids as a Fertilizer for Organic Tomato Transplant Production. *Horticulturae*, v. 11, n. 1, 1 jan. 2025.
- SCHMAUTZ, Z.; LOEU, F.; LIEBISCH, F.; GRABER, A.; MATHIS, A.; BULC, T. G.; JUNGE, R. Tomato productivity and quality in aquaponics: Comparison of three hydroponic methods. *Water (Switzerland)*, v. 8, n. 11, 16 nov. 2016.
- SILVA, A. A. da; DIAS, N. da S.; DANTAS JALES, G.; REBOUÇAS, T. C.; FERNANDES, P. D.; FERREIRA NETO, M.; MORAIS, P. L. D. de; PAIVA, E. P. de; FERNANDES, C. do S.; SÁ, F. V. da S. Fertigation with fish farming effluent at the adequate phenological stages improves physiological responses, production and quality of cherry tomato fruit. *International Journal of Phytoremediation*, v. 24, n. 3, p. 283–292, 2022.

- STEINKE, V. A.; SAITO, C. H. Exportação de carga poluidora para identificação de áreas úmidas sob risco ambiental na bacia hidrográfica da Lagoa Mirim. *Sociedade & Natureza*, v. 20, n. 2, p. 43–67, 2008.
- TAO, W. Q.; WU, Q. Q.; ZHANG, J.; CHANG, T. T.; LIU, X. N. Effects of Applying Organic Amendments on Soil Aggregate Structure and Tomato Yield in Facility Agriculture. *Plants*, v. 13, n. 21, 1 nov. 2024.
- VALÉRIO, V. J. de O. Da expansão da cana ao movimento da comida : agronegócio sucroenergético e abastecimento alimentar (hortifrúti) no estado de São Paulo (2006-2017). *Revista NERA*, v. 25, n. 62, p. 90–114, 2022.
- VICHIAN SAN, N.; CHATMANIWAT, K.; SUNGKORN, M.; LEKSAKUL, K.; CHAOPAISARN, P.; BOONYAWAN, D. Effect of Plasma-Activated Water Generated Using Plasma Jet on Tomato (*Solanum lycopersicum* L. var. cerasiforme) Seedling Growth. *Journal of Plant Growth Regulation*, n. 0123456789, 2022.
- XUE, F.; LIU, W.; CAO, H.; SONG, L.; JI, S.; TONG, L.; DING, R. Stomatal conductance of tomato leaves is regulated by both abscisic acid and leaf water potential under combined water and salt stress. *Physiologia Plantarum*, v. 172, n. 4, p. 2070–2078, 1 ago. 2021.
- ZHANG, F.; LIU, Y.; LIANG, Y.; DAI, Z.; ZHAO, Y.; SHI, Y.; GAO, J.; HOU, L.; ZHANG, Y.; AHAMMED, G. J. Improving the Yield and Quality of Tomato by Using Organic Fertilizer and Silicon Compared to Reducing Chemical Nitrogen Fertilization. *Agronomy*, v. 14, n. 5, 1 maio 2024.
- ZHAO, Y.; XIONG, H.; LUO, Y.; HU, B.; WANG, J.; TANG, X.; WANG, Y.; SHI, X.; ZHANG, Y.; RENNENBERG, H. Long-term nitrogen fertilization alters the partitioning of amino acids between citrus leaves and fruits. *Frontiers in Plant Science*, v. 15, 2024.

CAPÍTULO II

Potencial do resíduo de pintado como biofertilizante na modulação fisiológica e qualidade de frutos de tomateiro

Resumo

A busca por práticas agrícolas sustentáveis tem impulsionado a valorização de resíduos agroindustriais como biofertilizantes. Neste contexto, o resíduo sólido da piscicultura, rico em nutrientes, surge como uma alternativa promissora aos fertilizantes minerais sintéticos. Este estudo investigou as respostas fisiológicas e metabólicas do tomateiro cv. Sweet Heaven ao uso do resíduo sólido de pintado (*Pseudoplatystoma corruscans*) como biofertilizante. Foram avaliados os efeitos de cinco doses de resíduo (0, 15, 30, 45 e 60%) em três estádios fenológicos (vegetativo, florescimento e frutificação) por meio de análises destrutivas. A incorporação do resíduo ao substrato resultou em aumento linear da taxa fotossintética e dos teores de pigmentos (clorofila *b* e carotenoides), que refletiu em maior vigor vegetativo, evidenciado pelo incremento no diâmetro do caule. A análise da fluorescência da clorofila *a* indicou que as plantas adaptaram-se às demandas de cada estágio fenológico, ativando mecanismos de fotoproteção, como o aumento da dissipação de energia não fotoquímica durante a fase de frutificação. O principal benefício do biofertilizante foi verificado na qualidade dos frutos, e a dose de 30% proporcionou aumento significativo no teor de sólidos solúveis totais (°Brix), atributo de alto valor comercial. Contudo, doses mais elevadas (a partir de 45%) induziram um custo fisiológico, manifestado como estresse oxidativo, evidenciando pelo aumento dos níveis de malondialdeído (MDA) e pela ativação de enzimas do sistema de defesa antioxidante (SOD, CAT e POX), com maior intensidade na fase vegetativa. Os resultados indicam que o resíduo de pintado apresenta potencial para favorecer o desempenho fisiológico do tomateiro e melhorar a qualidade físico-química dos frutos. Contudo, o manejo da dose deve ser estratégico para evitar a indução de estresse oxidativo, especialmente nas fases iniciais do desenvolvimento da cultura.

Palavras-chave: biofertilizante; enzimas antioxidantes; estresse oxidativo; qualidade de frutos; *Solanum lycopersicum* cv. Sweet Heaven.

Potential of pintado (*Pseudoplatystoma corruscans*) waste as a biofertilizer in physiological modulation and tomato fruit quality

Abstract

The pursuit of sustainable agricultural practices has spurred the appreciation of agro-industrial waste as biofertilizers. In this context, solid waste from fish farming, rich in nutrients, emerges as a promising alternative to synthetic mineral fertilizers. This study provided an in-depth analysis of the physiological and metabolic responses of 'Sweet Heaven' tomato plants (*Solanum lycopersicum*) to the use of solid waste from pintado (*Pseudoplatystoma corruscans*) farming as a biofertilizer. The effects of five waste doses (0, 15, 30, 45, and 60%) were evaluated at three phenological stages (vegetative, flowering, and fruiting) through destructive analyses. The waste incorporation into the substrate resulted in a linear increase in the photosynthetic rate and pigment contents (chlorophyll *b* and carotenoids), which was reflected in greater vegetative vigor, evidenced by an increase in stem diameter. Chlorophyll *a* fluorescence analysis indicated that the plants adapted to the demands of each stage by activating photoprotective mechanisms, such as an increase in non-photochemical energy dissipation, during the fruiting phase. The main benefit of the biofertilizer was observed in fruit quality, where the 30% dose led to a significant increase in the total soluble solids (°Brix) content, a commercially valuable attribute. However, high doses (from 45% onwards) induced a physiological cost, manifested as oxidative stress, and confirmed by increased levels of malondialdehyde (MDA) and the activation of antioxidant defence enzymes (SOD, CAT, and POX), particularly in the vegetative stage. The results indicate that pintado waste shows potential to enhance physiological performance and the physicochemical quality of fruits. However, dose management must be strategic to avoid oxidative stress, especially during the early stages of crop development.

Keywords: biofertilizer; antioxidant enzymes; oxidative stress; fruit quality; *Solanum lycopersicum* cv. Sweet Heaven.

1. INTRODUÇÃO

O tomateiro (*Solanum lycopersicum* L.) é uma das hortaliças de maior importância econômica e nutricional em escala global, valorizado tanto pelo consumo *in natura* quanto pela indústria de processamento (PERVEEN *et al.*, 2015). Sua relevância nutricional decorre da alta concentração de compostos bioativos, como vitaminas, carotenoides e licopeno, conhecido por ser um poderoso antioxidante associado à prevenção de diversas doenças crônicas (CRUZ-CHAMORRO *et al.*, 2024b).

Os sistemas convencionais de produção de tomate demandam elevados insumos sintéticos, principalmente fertilizantes nitrogenados e fosfatados (MAO *et al.*, 2024). A dependência desses insumos causa sérios impactos ambientais, como contaminação de corpos hídricos por lixiviação, eutrofização, degradação da saúde do solo e emissão de gases de efeito estufa. Além disso, representa um custo significativo para os produtores (DAS *et al.*, 2023).

A busca por práticas agrícolas sustentáveis tem impulsionado o desenvolvimento e uso de biofertilizantes, cujo objetivo é o aproveitamento de resíduos para garantir a destinação adequada e promover a valorização desses materiais. Neste contexto, os biofertilizantes orgânicos surgem como alternativas promissoras aos fertilizantes químicos, capazes de fornecer nutrientes de forma gradual, melhorar as propriedades físico-químicas e biológicas do solo, e aumentar a eficiência do uso de nutrientes pelas plantas. Além de mitigar os impactos ambientais do descarte inadequado, a valorização de resíduos orgânicos reduz a dependência de recursos não renováveis, alinhando a produção de alimentos aos objetivos de desenvolvimento sustentável (PANDEY *et al.*, 2025).

A aquicultura, especialmente no cultivo do peixe pintado (*Pseudoplatystoma corruscans*), tem apresentado crescimento expressivo no Brasil, consolidando-se como importante fonte de proteína animal (MARQUES *et al.*, 2025). O pintado possui dieta carnívora, com altos níveis de proteínas (LEANDRO *et al.*, 2024). Entretanto, a dieta fornecida não é totalmente absorvida pelos peixes, gerando sobras que são excretadas ou decantadas no fundo dos tanques de cultivo (KURASAWA *et al.*, 2024). Um dos principais desafios da piscicultura é a gestão dos efluentes e resíduos sólidos, como o material sedimentado acumulado no fundo dos viveiros (KOSHELEVA *et al.*, 2022). Este material, rico em matéria orgânica, nitrogênio, fósforo, potássio e micronutrientes provenientes de ração não consumida e excretas dos peixes, é frequentemente considerado passivo ambiental (GO *et al.*, 2023).

No entanto, a utilização de resíduos orgânicos requer manejo cuidadoso quanto à dosagem. A alta concentração de íons liberados durante o processo de mineralização da matéria orgânica pode elevar a condutividade elétrica do substrato, gerando um potencial efeito salino

ou desequilíbrio osmótico. Nessas condições, a planta pode sofrer restrições na absorção de água e nutrientes, desencadeando respostas fisiológicas de estresse que impactam o metabolismo celular e a produtividade (SINGH *et al.*, 2024).

Apesar do potencial reconhecido desses resíduos, ainda há lacunas no conhecimento sobre os efeitos sistêmicos em culturas de alto valor agregado, como o tomate tipo ‘grape’. A literatura ainda precisa de estudos que investiguem de forma integrada os efeitos sobre o metabolismo secundário e os mecanismos fisiológicos associados à tolerância ao estresse. Enquanto a maioria das pesquisas foca apenas na produtividade, há pouca informação sobre como o biofertilizante sedimentado modula o metabolismo antioxidativo, especificamente a atividade de enzimas de defesa como a superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT) e peroxidases (POX), e a integridade celular frente a possíveis estresses abióticos. Adicionalmente, é crucial compreender a influência desse manejo orgânico sobre a síntese de pigmentos fotossintéticos e, sobretudo, nos parâmetros de qualidade físico-química dos frutos, como teor de sólidos solúveis (°Brix) e coloração, ao longo dos diferentes estádios fenológicos da planta.

A hipótese principal deste estudo é que o resíduo proveniente do cultivo de pintado, utilizado como substituto parcial da adubação convencional, pode manter ou até otimizar o desempenho fisiológico das plantas e a qualidade nutricional dos frutos de tomate tipo ‘grape’, configurando como uso integrado de fertilizantes orgânicos e minerais de produção mais sustentável e de menor custo. Do ponto de vista nutricional, os sedimentos de piscicultura diferem dos fertilizantes minerais por apresentarem uma matriz complexa. Além dos macronutrientes primários (N, P, K), esses resíduos são fontes significativas de cálcio e micronutrientes, como ferro e zinco, essenciais para a integridade da membrana celular e ativação enzimática. Adicionalmente, a mineralização da matéria orgânica libera compostos bioativos e aminoácidos que podem atuar como bioestimulantes, favorecendo a absorção radicular e a eficiência do uso de nutrientes, embora a dinâmica de liberação seja mais lenta e dependente da relação C/N do material (ZHOU *et al.*, 2025).

O objetivo deste trabalho foi caracterizar o metabolismo, a fisiologia e a qualidade físico-química dos frutos de tomateiro tipo ‘grape’ cultivados em substratos com diferentes doses de biofertilizante, obtido a partir de resíduo sólido gerado do cultivo de pintado (*Pseudoplatystoma corruscans*).

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Caracterização do local do experimento e delineamento experimental

O experimento foi realizado em casa de vegetação climatizada do Laboratório de Ecofisiologia e Produtividade Vegetal do IF Goiano, Campus Rio Verde, GO, Brasil (17°48'18.33" S e 50°54'0.04" O, 748 m de altitude). As condições ambientais foram controladas, com temperatura média de 25°C e umidade relativa mantida em 60%.

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente ao acaso (DIC), com arranjo fatorial 5 x 3, contendo cinco doses de resíduo (0%, 15%, 30%, 45% e 60%) e três estádios fenológicos para avaliação (vegetativo, florescimento e frutificação). Foram aplicadas cinco repetições por tratamento, totalizando 75 unidades experimentais. Cada unidade experimental foi constituída por um vaso com uma planta. As avaliações foram invasivas, utilizando um conjunto independente de 25 vasos em cada estágio (5 doses x 5 repetições).

Tabela 1- Composição dos tratamentos utilizados no cultivo do tomateiro cv. Sweet Heaven compostos por substrato padrão (solo:areia, 2/1 v/v), com adubação mineral e tratamentos com diferentes proporções de resíduos do viveiro escavado de piscicultura do cultivo de pintado.

Tratamento	Composição
Controle	100% substrato padrão
15%	85% substrato padrão + 15% resíduo pintado.
30%	70% substrato padrão + 30% resíduo pintado.
45%	55% substrato padrão + 45% resíduo pintado.
60%	40% substrato padrão + 60% resíduo pintado.

Cada vaso, com capacidade de 8 litros, foi composto por 1 litro de brita (granulometria entre 9,5 mm e 19 mm), recoberta por manta para drenagem (manta Bidim, Geotexil, Amanco), com a finalidade de reter o substrato e permitir a adequada drenagem da água de irrigação. O volume restante foi preenchido com 6 litros dos substratos formulados.

As plantas foram tutoradas verticalmente com fitilho de microfibras, fixado em estrutura no teto da casa de vegetação, utilizando grampos como suporte. Foram instaladas armadilhas amarelas Biotrap para o monitoramento e a captura de insetos invasores. Aplicações preventivas de inseticida químico (Clorpirifós 480 EC), inseticida biológico (Bouveriz/WP) e fungicida químico (Metiltiofan®) foram realizadas, conforme as recomendações para a cultura do tomate.

2.2. Preparo dos substratos

O substrato padrão utilizado na composição dos tratamentos foi constituído por solo e areia comercial na proporção 2:1 (v/v). O solo, classificado como Latossolo Vermelho distroférico (LVdf), foi obtido na fazenda experimental do IF Goiano, Campus Rio Verde (Santos *et al.*, 2018), enquanto a areia grossa foi adquirida comercialmente. O substrato foi peneirado e submetido à análise de suas propriedades físico-químicas, conforme metodologia descrita por Malavolta (1980), cujos resultados estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Caracterização físico-química do substrato base (Latossolo Vermelho distroférico e areia, 2:1 v/v) utilizado como controle e na formulação dos demais tratamentos.

Parâmetro	Unidade	Valor
Macronutrientes		
Fósforo (P-Mehlich)	mg dm ⁻³	1,7
Potássio (K)	mg dm ⁻³	20
Enxofre (S)	mg dm ⁻³	5
Sódio (Na)	mg dm ⁻³	7
Micronutrientes		
Boro (B)	mg dm ⁻³	0
Cobre (Cu)	mg dm ⁻³	0,9
Ferro (Fe)	mg dm ⁻³	74,7
Manganês (Mn)	mg dm ⁻³	7,9
Zinco (Zn)	mg dm ⁻³	1
Características de Fertilidade		
Matéria Orgânica (MO)	%	2,6
Soma de Bases (SB) ¹	cmol _c dm ⁻³	0,9
Capacidade de Troca Catiônica (CTC) ²	cmol _c dm ⁻³	2,4
Saturação por Bases (V%) ³	%	38,8
Fósforo Remanescente (P-rem)	mg L ⁻¹	ND ⁴

Legenda: ¹SB: Soma de Bases; ²CTC: Capacidade de Troca Catiônica; ³V%: Saturação por Bases; ⁴ND: Não Detectado.

A saturação por bases do substrato foi ajustada para 70% com a aplicação de calcário comercial (28% CaO, 17% MgO, PRNT 93%), na dose de 4,5 mg ha⁻¹, seguida de incubação por 30 dias, com irrigação periódica para acelerar a reação. Posteriormente, o substrato foi fertilizado, conforme as recomendações para a cultura do tomateiro (TEIXEIRA *et al.*, 2017).

O experimento utilizou resíduo (sedimentos sólidos decantáveis) composto majoritariamente por excretas, sobras de ração, zooplâncton, fitoplâncton e material orgânico proveniente da decomposição de peixes mortos, oriundo de um sistema de cultivo intensivo de pintado (*Pseudoplatystoma corruscans*) em Itapirapuã, GO. A produção ocorreu em viveiro escavado em solo natural (sem revestimento), com área de espelho d'água de 1.926,71 m² (95,0 m de comprimento × 20,0 m de largura) e lâmina d'água com profundidade média de 1,8 m, totalizando volume estimado de 3.468 m³. O material foi coletado ao final de um ciclo produtivo de 200 kg, no qual os peixes foram introduzidos com comprimento entre 8 e 12 cm e atingiram massa final entre 1.600 e 1.800 g, sob manejo alimentar com ração contendo 40% de proteína bruta (PB) na fase inicial e 32% na fase de terminação.

Após a despesca e drenagem do viveiro (15 dias), o resíduo foi coletado a 10 cm de profundidade, com cuidado para evitar a mistura com o solo subjacente (aproximadamente 20 cm da superfície). O material foi higienizado, armazenado em sacos de ráfia, transportado ao IF Goiano, e foi seco por 15 dias em galpão coberto e ventilado. Em seguida, o material foi padronizado por peneiramento (malha 15 x 32) e submetido à análise físico-química (Tabela 3).

Tabela 3 - Caracterização físico-química do resíduo sólido da piscicultura de pintado (*Pseudoplatystoma corruscans*) utilizado na composição dos tratamentos.

	MO	Umidade		P ₂ O ₅	N	Ca	Mg	S
pH	(%)	(%)	C/N	(%)	(mg Kg ⁻¹)	(mg Kg ⁻¹)	(mg Kg ⁻¹)	(mg Kg ⁻¹)
6,5	6,7	3,8	38	0,13	0,10	0,04	0,04	0,02
B	Mo	Cu	Fe	Mn	Zn	C Org	CTC	K ₂ O
(mg Kg ⁻¹)	(mg ⁻¹ Kg ⁻¹)	(mg Kg ⁻¹)	(mg Kg ⁻¹)	(mg Kg ⁻¹)	(mg Kg ⁻¹)	(%)	mmolc	(%)
6	2	3	3177	27	31	3,8	90	0,07

Legenda: MO: Matéria Orgânica; C/N: Relação Carbono/Nitrogênio; P₂O₅: Pentóxido de Fósforo; N: Nitrogênio; Ca: Cálcio; Mg: Magnésio; S: Enxofre; B: Boro; Mo: Molibdênio; Cu:

Cobre; Fe: Ferro; Mn: Manganês; Zn: Zinco; C Org: Carbono Orgânico; CTC: Capacidade de Troca Catiônica; K₂O: Óxido de Potássio.

Devido à baixa fertilidade natural do substrato composto por solo e areia na proporção de 1:1 (v/v), realizou-se adubação de base com o objetivo de suprir as exigências nutricionais da cultura do tomateiro, de acordo com as recomendações de MALAVOLTA (1980) e NOVAIS *et al.* (1991). A composição detalhada da fertilização, incluindo a dose e as fontes de cada nutriente aplicado, está apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 – Dose e fonte dos nutrientes aplicados via fertilização de base no substrato para o cultivo do tomateiro cv. Sweet Heaven.

Nutriente	Dose Aplicada (mg dm ⁻³)	Fonte do Nutriente
Nitrogênio	60	KNO ₃
Fósforo	153	NH ₄ H ₂ PO ₄
Potássio	40	KH ₂ PO ₄
Enxofre	60	MgSO ₄
Magnésio	45	MgSO ₄
Boro	0,8	H ₃ BO ₃
Cobre	1,5	CuSO ₄ ·5H ₂ O
Ferro	5	Fe-EDTA (5 g L ⁻¹)
Manganês	4	MnCl ₂ ·4H ₂ O
Molibdênio	0,15	H ₂ MoO ₄
Zinco	5	ZnSO ₄ ·7H ₂ O

2.3. Adubação de cobertura

A adubação de cobertura via fertirrigação foi formulada com sais de alta pureza, visando suprir integralmente a demanda nutricional das plantas no tratamento controle. Nos demais tratamentos, a fertilização química foi reduzida proporcionalmente à fração do substrato padrão substituída pelo resíduo. As aplicações tiveram início quando as plantas atingiram o estágio de cinco folhas verdadeiras, sendo realizadas a cada dois dias, conforme cronograma adaptado à fenologia da cultura.

O manejo foi dividido em duas etapas, com aplicação manual direcionada exclusivamente à região do colo da planta (base do caule), a fim de evitar o contato com a parte aérea: Fase A (estádio vegetativo): aplicação de 500 mL de solução por planta, diretamente no substrato; Fase B (estádios de florescimento e reprodutivo): volume ajustado para 800 mL de

solução por planta. A concentração da solução nutritiva foi ajustada de forma inversamente proporcional à dose de resíduo presente no substrato (0, 15, 30, 45 e 60%), conforme detalhado na Tabela 5.

Tabela 5 - Composição da solução nutritiva utilizada na fertirrigação do tomateiro cv. Sweet Heaven nas fases vegetativa (A) e reprodutiva (B), em função das diferentes doses de resíduo no substrato.

Sais	Fase A (Vegetativo) (g 50L ⁻¹)					Fase B (Reprodutivo) (g 50L ⁻¹)				
	Dose (%)					Dose (%)				
	0	15	30	45	60	0	15	30	45	60
Nitrato de Potássio (g)	7,5	6,375	5,25	4,125	3	2	1,7	1,4	1,1	0,8
Nitrato de Cálcio (g)	40	34	28	22	16	55	46,75	38,5	30,25	22
Monoamôniofosfato (g)	12,5	10,625	8,75	6,875	5	12,5	10,625	8,75	6,875	5
Sulfato de Magnésio (g)	20	17	14	11	8	20	17	14	11	8
Cloreto de Potássio (g)	25	21,25	17,5	13,75	10	38	32,3	26,6	20,9	15,2
Fe-EDTA (mL) ¹	24	20,4	16,8	13,2	9,6	24	20,4	16,8	13,2	9,6
Ácido bórico (mg)	150	127,5	105	82,5	60	150	127,5	105	82,5	60
Sulfato de cobre (mg)	10	8,5	7	5,5	4	10	8,5	7	5,5	4
Sulfato de manganês (mg)	150	127,5	105	82,5	60	150	127,5	105	82,5	60
Sulfato de zinco (mg)	25	21,25	17,5	13,75	10	25	21,25	17,5	13,75	10
Molibdato de sódio (mg)	7,5	6,375	5,25	4,125	3	7,5	6,375	5,25	4,125	3

Legenda: Os valores indicam a massa de cada sal, em gramas (g) ou miligramas (mg), conforme indicado na primeira coluna, para o preparo de 50 litros de solução nutritiva. As aplicações foram realizadas a cada 48 horas. ¹A unidade para Fe-EDTA refere-se ao volume (mL) de uma solução estoque de Fe (5 g L⁻¹).

2.4. Preparo das mudas

O material genético utilizado foi o tomateiro cv. Sweet Heaven (Sakata®), do segmento 'grape' e de crescimento indeterminado, selecionado pela elevada rusticidade, tolerância ao rachamento de frutos e plasticidade adaptativa, características que favorecem um ciclo produtivo prolongado. As sementes, provenientes do Laboratório de Cultura de Tecidos Vegetais (LCTV) do IF Goiano, Campus Rio Verde, foram semeadas em bandejas de PVC (50 células de 3 x 3 cm), preenchidas com substrato comercial (Carolina Soil®), à profundidade de 1 cm.

O manejo hídrico foi realizado por microaspersão (tipo bailarina), com emissores calibrados para vazão de 76 L h^{-1} sob pressão de 150 kPa (1,5 bar). O sistema automatizado (BTT-101, Hunter Industries®) foi programado para dois pulsos diários de irrigação (08h00 e 16h00), com duração de 20 minutos, mantendo o substrato próximo à capacidade de campo até o transplântio, realizado aos 21 dias após a semeadura (DAS), no estágio de emissão da terceira folha definitiva.

2.5. Avaliações

2.5.1. Variáveis fisiológicas

As avaliações fisiológicas (trocas gasosas e fluorescência da clorofila *a*) foram realizadas na terceira folha completamente expandida partindo do ápice, três estádios fenológicos: vegetativo, florescimento e frutificação.

As trocas gasosas foram determinadas utilizando analisador de gás infravermelho (IRGA, modelo Li-6800xt, Li-cor, Nebraska, EUA), para obtenção da taxa fotossintética (A , $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), condutância estomática (g_s , $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), taxa transpiratória (E , $\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), e razão entre as concentrações interna e externa de CO_2 (C_i/C_a). As medições foram realizadas entre 08h e 11h, sob densidade de fluxo de fótons fotossintético (PPFD, $1500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), concentração de CO_2 ($\sim 400 \mu\text{mol mol}^{-1}$) e temperatura ($\sim 25,5^\circ\text{C}$) constantes, e umidade relativa ($\sim 50\%$) ambiente.

A atividade fotossintética foi avaliada através da análise da fluorescência da clorofila *a*, utilizando sistema de imagem de pulso modulado (IMAGING-PAM, Walz, Effeltrich, Alemanha), na mesma folha utilizada para as trocas gasosas. As plantas foram previamente adaptadas ao escuro por 30 minutos para garantir a oxidação completa dos centros de reação do fotossistema II (FSII). Em seguida, foram obtidas a fluorescência inicial (F_0) e a fluorescência máxima (F_m), permitindo o cálculo da eficiência quântica máxima do FSII ($F_v/F_m = (F_m - F_0) / F_m$). Após a adaptação ao claro, foram obtidos os parâmetros de fluorescência em estado estacionário (F_s), fluorescência máxima sob iluminação (F_m'), rendimento quântico efetivo do PSII ($Y_{II} = (F_m' - F_s) / F_m'$) (GENTY; BRIANTAIS; BAKER, 1989), rendimento quântico da dissipação não fotoquímica regulada ($Y(\text{NPQ}) = (F_s/F_m') - (F_s/F_m)$) (KRAMER *et al.*, 2004), que reflete a dissipação de energia na forma de calor, e taxa de transporte de elétrons ($\text{ETR} = Y_{II} \times \text{PAR} \times 0,84 \times 0,5$) (BILGER; SCHREIBER; BOCK, 1995), em que 0,84 representa a fração de luz incidente absorvida pela folha (EHLERINGER, 1981) e 0,5 a fração de excitação direcionada ao PSII (LAISK; LORETO, 1996). As medições foram realizadas entre 07h e 11h.

2.5.2 Pigmentos de cloroplasto

As concentrações dos pigmentos cloroplastídicos foram determinadas por extração com dimetilsulfóxido (DMSO), conforme o método de Ronen e Galun (1984). Discos foliares foram incubados em solução de DMSO saturada com carbonato de cálcio por 24 horas a 65°C em banho-maria. A absorbância da solução foi medida nos comprimentos de onda de 480, 649 e 665 nm, utilizando um espectrofotômetro UV-VIS (Evolution 60S, Thermo Fisher Scientific Inc., Needham, MA, EUA). As concentrações de clorofila *a* (Chla), clorofila *b* (Chlb) e carotenoides totais (Car) foram calculadas utilizando as equações de (WELLBURN, 1994) para o solvente DMSO: $\text{Chla } (\mu\text{g mL}^{-1}) = 12,19 \times A_{665} - 3,45 \times A_{649}$; $\text{Chlb } (\mu\text{g mL}^{-1}) = 21,99 \times A_{649} - 5,32 \times A_{665}$; $\text{Car } (\mu\text{g mL}^{-1}) = (1000 \times A_{480} - 2,14 \times \text{Chla} - 70,16 \times \text{Chlb}) / 220$. Os resultados foram posteriormente expressos por unidade de área foliar ($\mu\text{g cm}^2$) (WELLBURN, 1994).

2.5.3 Variáveis morfológicas

Para as variáveis morfológicas e de crescimento foram realizadas nos três estádios fenológicos (vegetativo, florescimento e frutificação), para a determinação da altura da planta (AP, cm), medida com trena milimétrica, considerando a distância entre a base da planta, ao nível do solo, e a gema apical (OTONI *et al.*, 2012a); o diâmetro do caule (DC, mm) mensurado com paquímetro graduado (0,1 mm) na região do colo da planta; o número de folhas obtido através da contagem direta de todas as folhas completamente expandidas e fotossinteticamente ativas em cada planta; e o número de nós determinado pela contagem de todos os nós presentes ao longo da haste principal da planta.

2.5.4 Variáveis de produção

Para componentes produtivos, foram coletados frutos maduros por duas semanas, contabilizados e pesados para determinar número, massa total e médio dos frutos por parcela. A massa média dos frutos foi obtida pela razão entre a massa dos frutos da parcela e o número dos frutos da parcela.

Ao final do experimento, foram avaliadas a altura da planta, diâmetro e número de nós. Posteriormente, as folhas e os colmos foram separados, secos em estufa de circulação forçada a 65°C por 5 dias, para a obtenção da massa seca das folhas (MSF) e massa seca dos colmos (MSC) de cada parcela. A massa seca da parte aérea (MSPA) foi calculada pela soma do MSF e MSC.

2.5.5 Produção de Frutos

Para a análise dos componentes de produção, as colheitas foram realizadas semanalmente ao longo de 15 dias, selecionando apenas os frutos que atingiram a maturação completa. Os frutos de cada planta foram contabilizados para determinar o número de frutos e pesados em balança de precisão para obter a massa total de frutos (g). A massa média de frutos (g) foi calculada pela razão entre a massa total e o número de frutos de cada parcela.

2.5.6 Qualidade Físico-Química dos Frutos

A qualidade físico-química foi avaliada em uma amostra de frutos maduros de cada parcela. O teor de sólidos solúveis totais (°Brix) foi medido com refratômetro manual (Refratômetro Medidor Brix 0-32%, Akso Medição, São Paulo - SP, Brasil), e expresso em grau Brix (°Brix).

A acidez titulável (AT) e o pH também foram mensurados a partir do suco dos frutos, seguindo a metodologia do Instituto Adolfo Lutz. Adicionalmente, a coloração da polpa foi determinada em um colorímetro para obter os valores do sistema CIELab: Luminosidade (L^*), coordenada a^* e coordenada b^* , a partir dos quais foram calculados o Croma e o Ângulo Hue.

2.5.7 Determinação de Danos às Membranas Celulares

O nível de peroxidação lipídica foi estimativo pela quantificação do malondialdeído (MDA), um produto da decomposição de ácidos graxos poli-insaturados peroxidados presentes nos lipídios de membrana, conforme o método descrito por HEATH; PACKER, (1968). Amostras foliares (0,160 g) foram homogeneizadas em 2 mL de ácido tricloroacético (TCA) a 1% (p/v) com 20% de polivinilpirrolidona (PVPP). O homogenato foi centrifugado a $12.000 \times g$ por 15 min a 4°C. Uma alíquota do sobrenadante (500 μ L) foi então adicionada a 2 mL de reagente ácido tiobarbitúrico (TBA), preparado com 0,5% (p/v) de TBA em 20% de TCA. A mistura de reação foi incubada em banho-maria a 95°C por 20 min, seguida de resfriamento rápido em banho de gelo e centrifugada a $3000 \times g$ por 4 min. A absorbância do sobrenadante foi medida a 532 e 600 nm em espectrofotômetro UV-Vis. A concentração de MDA foi calculada utilizando o coeficiente de extinção molar de $155 \text{ mM}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ (HEATH; PACKER, 1968), e os resultados foram expressos em nmol MDA g^{-1} de massa seca.

2.5.8 Determinação da Atividade Enzimática

Os extratos enzimáticos para a determinação da atividade das enzimas superóxido dismutase (SOD) e catalase (CAT) foram obtidos por meio da maceração de aproximadamente

50 mg de folhas em 1 mL de meio de extração, constituído por tampão fosfato de potássio (0,1 M, pH 6,8), EDTA (0,1 mM), fluoreto de fenilmetilsulfônico (PMSF) (1 mM) e polivinilpirrolidona (PVPP) (1% p/v). O extrato foi centrifugado a 12.000 rpm por 15 min, a 4°C. O sobrenadante obtido foi utilizado para a determinação da atividade enzimática.

A atividade da superóxido dismutase (SOD) foi determinada com base na capacidade de inibir a fotorredução do p-nitroazul de tetrazólio (NBT), conforme GIANNOPOLITIS; RIES (1977). O meio de reação foi composto por tampão fosfato de potássio (50 mM, pH 7,8), EDTA (0,1 mM), metionina (13 mM), NBT (75 μ M) e riboflavina (2 μ M). A reação foi iniciada pela exposição à luz fluorescente (15 W) por 10 min, e a absorbância foi medida a 560 nm. Uma unidade de SOD foi definida como a quantidade de enzima necessária para inibir em 50% a fotorredução do NBT (BEAUCHAMP; FRIDOVICH, 1971). A atividade enzimática foi expressa em μ mol min⁻¹ mg⁻¹ de proteína.

A atividade da catalase (CAT) foi determinada pelo monitoramento da decomposição do peróxido de hidrogênio (H₂O₂) a 240 nm, durante 1 minuto (HAVIR; MCHALE, 1987). O meio de reação consistiu em tampão fosfato de potássio (50 mM, pH 7,0) e H₂O₂ (12,5 mM). A atividade foi calculada utilizando o coeficiente de extinção molar de 36 M⁻¹ cm⁻¹ (ANDERSON; PRASAD; STEWART, 1995). A atividade enzimática foi expressa em μ mol min⁻¹ mg⁻¹ de proteína.

A atividade da enzima guaiacol peroxidase (POX) foi determinada pela oxidação do pirogalol na presença de H₂O₂, monitorando-se a formação de purpurogalina a 420 nm durante 1 minuto (KAR; MISHRA, 1976). O meio de reação continha tampão fosfato de potássio (25 mM, pH 6,8), pirogalol (20 mM) e H₂O₂ (80 mM). A atividade foi calculada utilizando o coeficiente de extinção molar de 2,47 mM⁻¹ cm⁻¹ (MAEHLY, 1954). A atividade enzimática foi expressa em μ mol min⁻¹ mg⁻¹ de proteína.

O teor de proteínas totais foi quantificado pelo método de BRADFORD (1976). Para a quantificação, utilizou-se uma curva padrão de soroalbumina bovina (BSA), com concentrações variando de 0 a 50 μ g. As leituras de absorbância das amostras foram realizadas em espectrofotômetro no comprimento de onda de 595 nm.

2.6 Análises estatísticas

Os dados foram inicialmente submetidos aos testes de normalidade dos resíduos (Shapiro-Wilk) e homogeneidade de variâncias (Bartlett). Atendidos os pressupostos, procedeu-se à análise de variância (ANOVA) em arranjo fatorial, considerando os efeitos dos fatores dose, estágio fenológico e a interação entre eles (teste F; $p < 0,05$). Na ausência de

interação significativa, os efeitos principais foram analisados de forma isolada. Nesses casos, as médias foram estimadas a partir do agrupamento do fator não analisado, resultando no aumento do número de observações (n) e no poder estatístico das comparações. Quando a interação foi significativa, realizou-se o desdobramento dos fatores, com comparação de médias pelo teste de agrupamento de Scott-Knott ($p < 0,05$).

Para o fator dose, realizou-se análise de regressão polinomial, selecionando o modelo de maior ordem com significância estatística e ajuste biológico adequado. Todas as análises foram conduzidas no software R (versão 4.3.2).

3. Resultados

3.1. Trocas Gasosas

As variáveis de trocas gasosas não apresentaram interação entre os fatores avaliados ($p > 0,05$). A taxa fotossintética (A) respondeu de forma linear e positiva às doses crescentes de biofertilizante. O estágio fenológico também exerceu efeito significativo ($p < 0,001$), sendo o maior valor de A observado no estágio de florescimento (Figura 1).

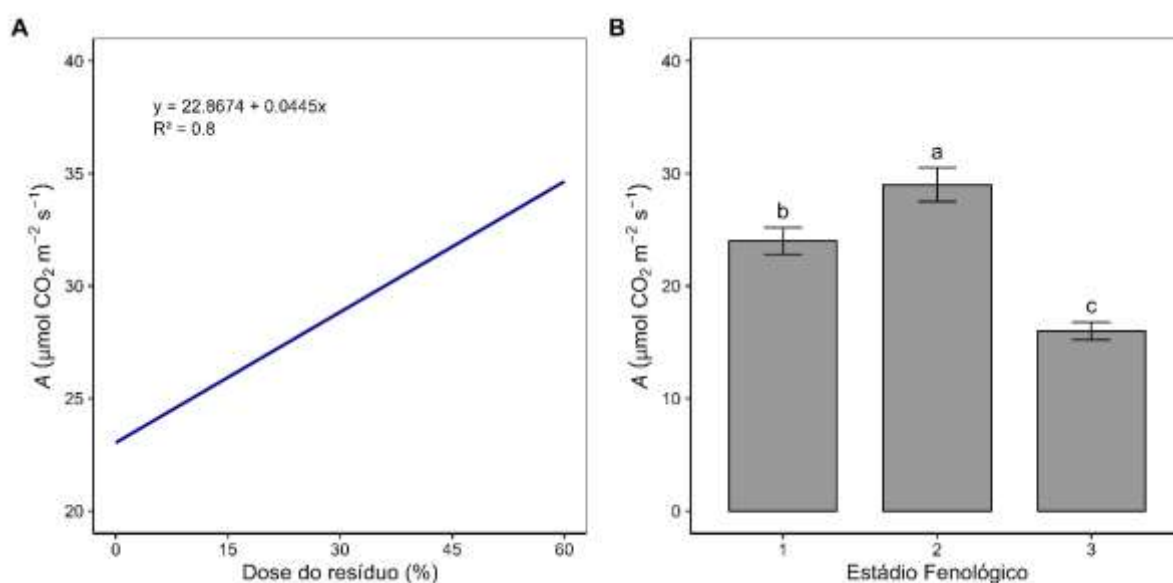


Figura 1 - Taxa fotossintética líquida (A) do tomateiro cv. Sweet Heaven em função de doses de resíduo sólido de pintado (A) e estádios de desenvolvimento (B). (A) Análise de regressão linear para o fator dose. (B) Barras indicam médias $\pm$ EP. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).

As variáveis taxa de transpiração (E) e condutância estomática (g_s) não foram influenciadas pelas doses do resíduo ($p > 0,05$). A transpiração variou apenas entre os estádios

fenológicos, com menor média no estágio de frutificação em comparação com os demais. Para a condutância estomática, não houve efeito significativo de nenhum dos fatores (Figura 2).

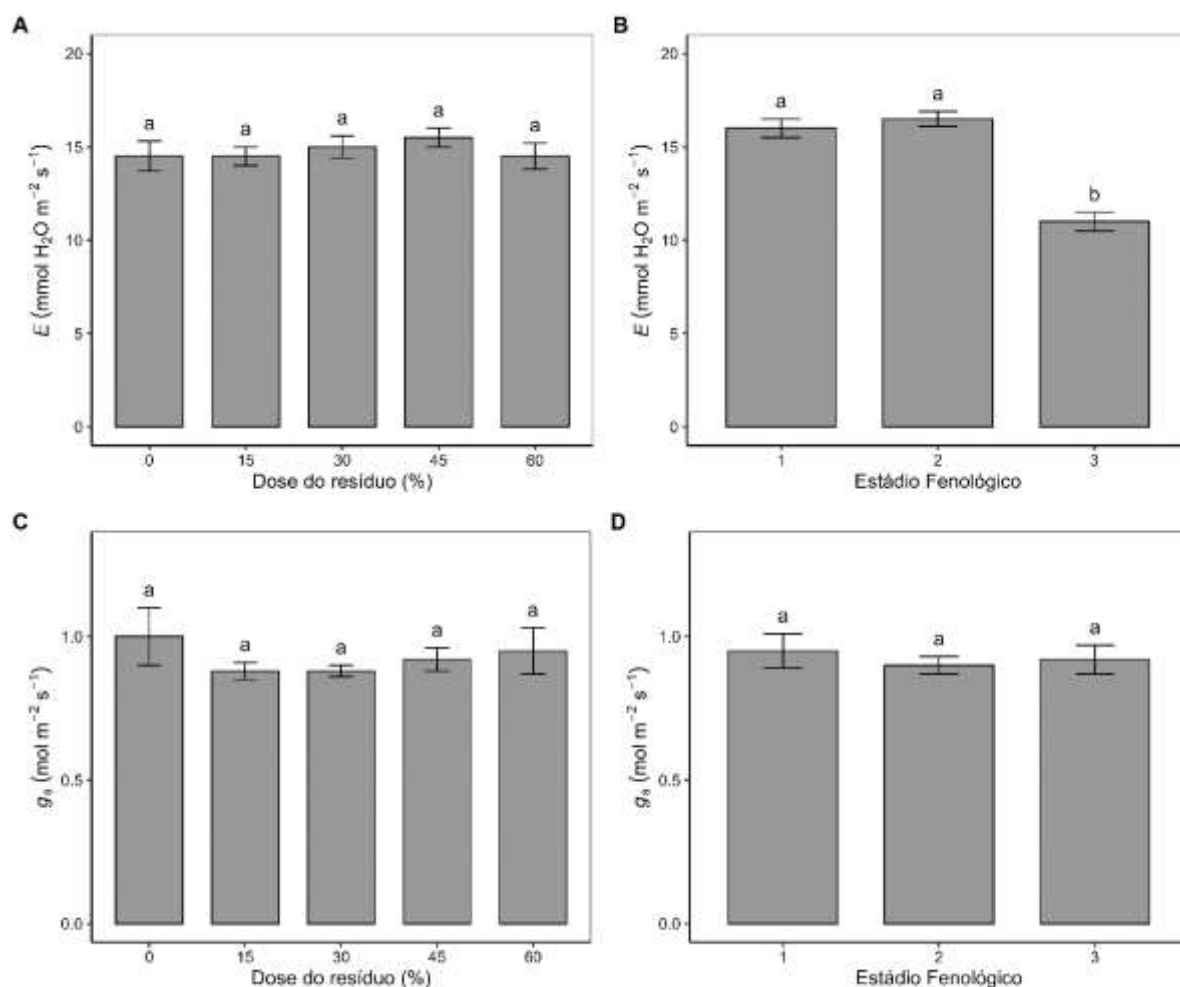


Figura 2 – Taxa de transpiração (E ; A e B) e condutância estomática (g_s ; C e D) do tomateiro cv. Sweet Heaven, em função de doses de resíduo sólido de pintado (A e C) e estádios de desenvolvimento (B e D). Barras indicam médias $\pm$ EP. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).

A razão entre a concentração interna e externa de CO_2 (C_i/C_a) foi influenciada pelas doses do resíduo, ajustando-se ao modelo quadrático, com valor mínimo estimado na dose de 35,5%. O estágio de frutificação apresentou a menor média para esta variável, diferindo dos estádios vegetativo e de florescimento (Figura 3).

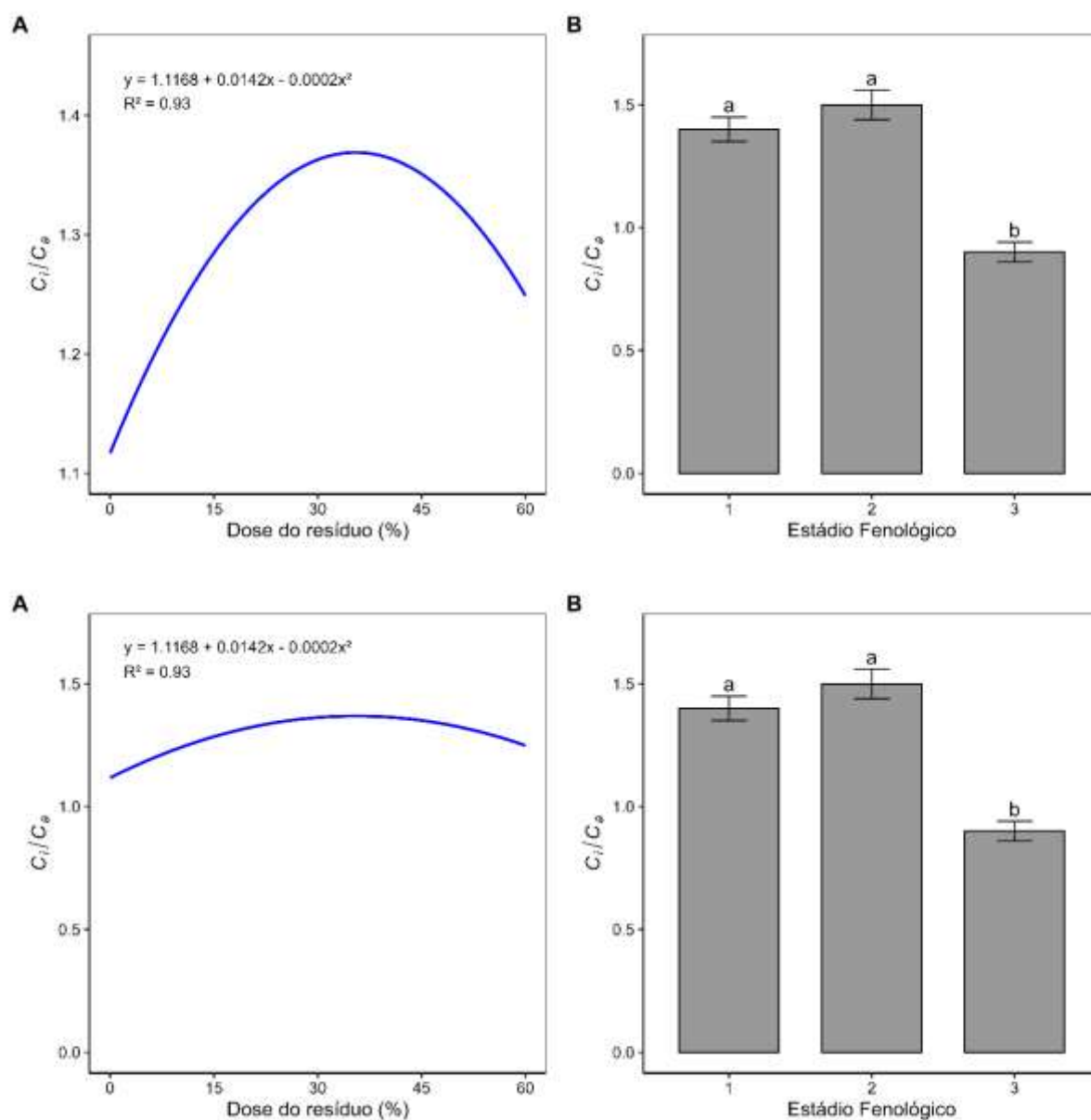


Figura 3 – Razão entre a concentração de CO_2 intercelular e extracelular (C_i/C_a) do tomateiro cv. Sweet Heaven em função de doses de resíduo sólido de pintado (A) e estádios de desenvolvimento (B). (A) Análise de regressão quadrática para o fator dose. (B) Barras indicam médias $\pm$ EP. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).

3.2. Fluorescência da Clorofila a

A análise dos parâmetros de fluorescência da clorofila *a* revelou respostas diferenciais aos tratamentos.

A razão F_v/F_m não foi influenciada pelas doses do resíduo, porém apresentou efeito significativo dos estádios fenológicos, com menor valor no estágio de frutificação em comparação aos estádios vegetativos e de florescimento (Figura 4).

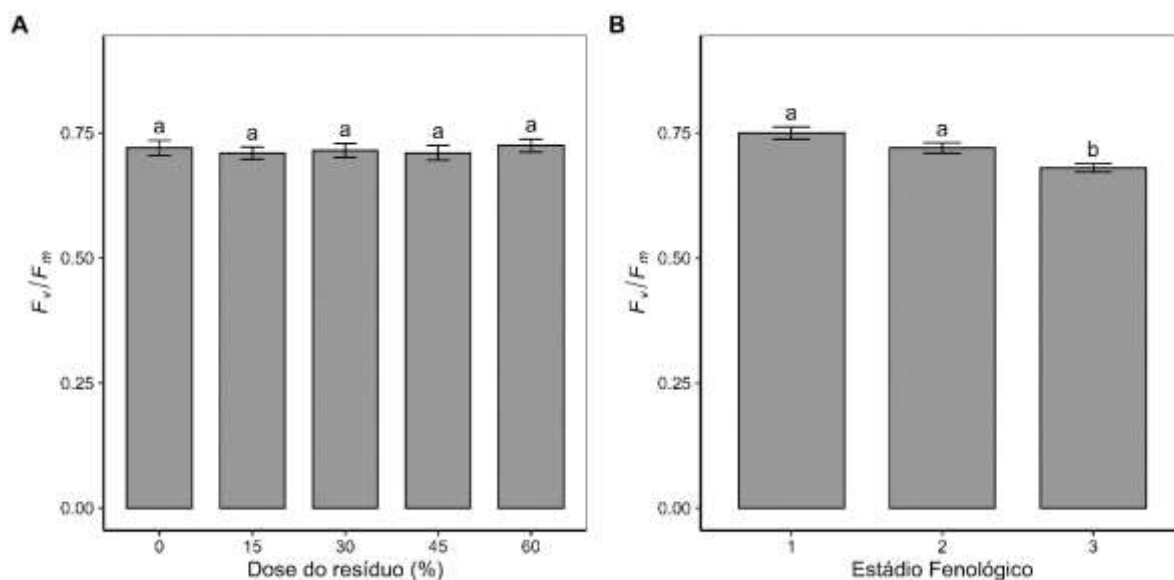


Figura 4 – Eficiência quântica máxima do fotossistema II (F_v/F_m) do tomateiro cv. Sweet Heaven em função de doses de resíduo sólido de pintado (A) e estádios de desenvolvimento (B). Barras indicam médias $\pm$ EP. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).

Para o Y_{II} , não houve interação significativa entre os fatores, embora ambos tenham apresentado efeitos isolados. As doses do resíduo promoveram ajuste quadrático, com ponto de mínimo estimado na dose de 22,5%. O estágio de frutificação apresentou média superior ao de florescimento (Figura 5).

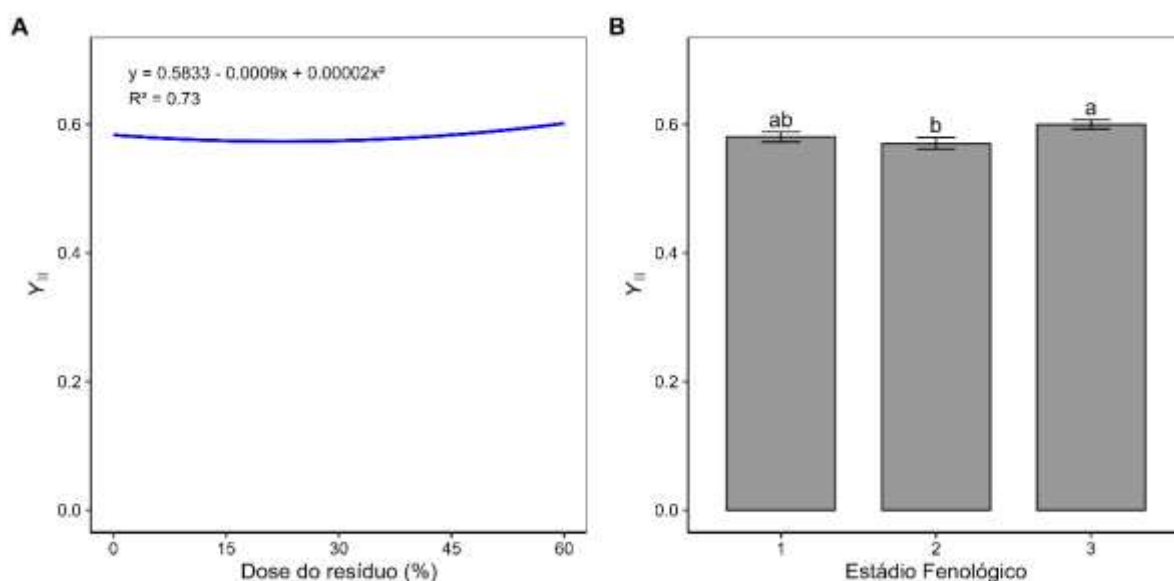


Figura 5 – Rendimento quântico efetivo do fotossistema II (Y_{II}) do tomateiro cv. Sweet Heaven em função de doses de resíduo sólido de pintado (A) e estádios de desenvolvimento (B). (A) Análise de regressão quadrática. (B) Barras indicam médias $\pm$ EP. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).

Foi observada interação significativa ($p < 0,01$) entre doses e estádios para Y_{NPQ} . No desdobramento, verificou-se efeito das doses apenas no estágio vegetativo, em que as doses de 45% e 60% reduziram os valores em relação ao controle (Figura 6).

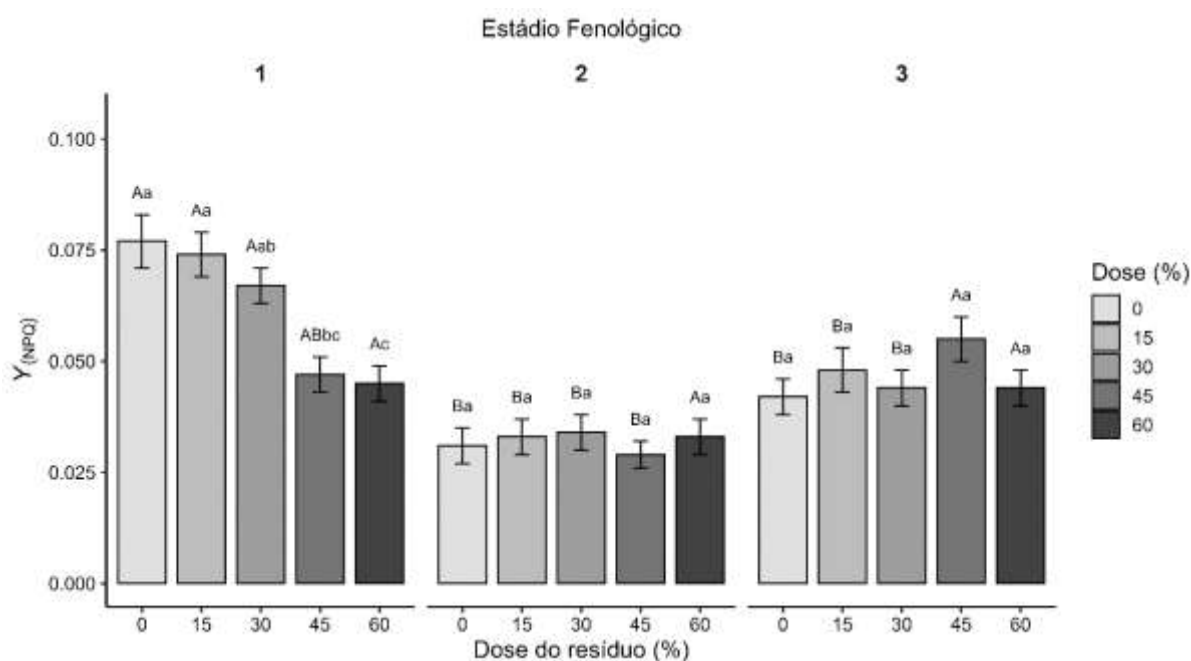


Figura 6 - Interação entre doses de resíduo sólido de pintado (%) e estádios de desenvolvimento para o rendimento quântico da dissipação não fotoquímica (Y_{NPQ}) do tomateiro cv. Sweet Heaven. Barras indicam médias $\pm$ EP. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula comparando doses em cada estágio, e minúsculas comparando estágio para cada dose não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).

O rendimento quântico da dissipação não regulada (Y_{NO}) não foi influenciado pelas diferentes doses do resíduo. No entanto, o estágio de florescimento apresentou o maior valor médio para essa variável (Figura 7).

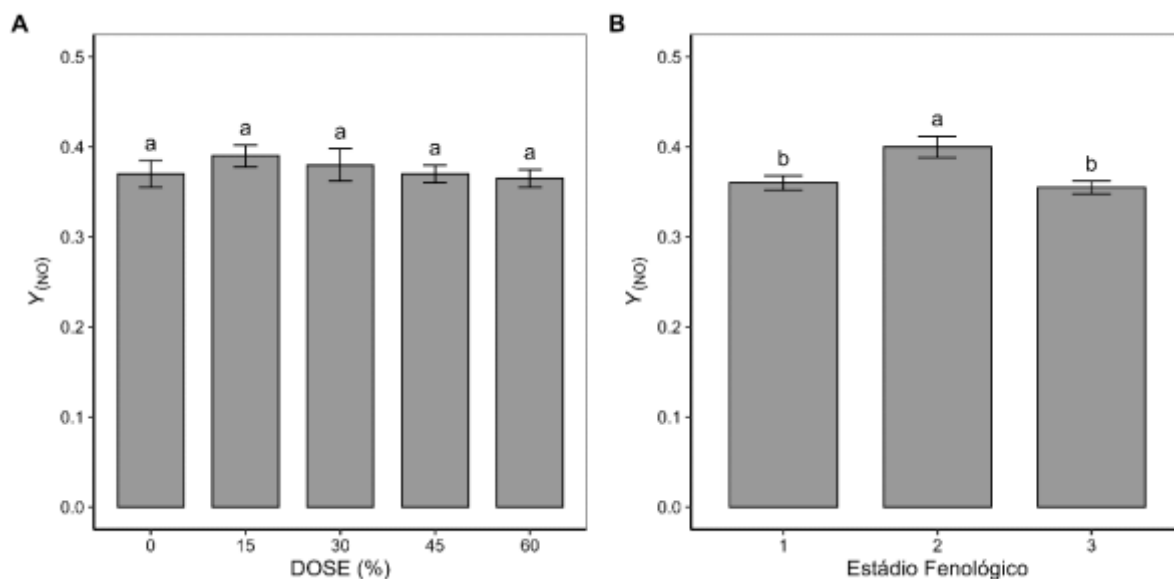


Figura 7 - Rendimento quântico da dissipação não regulada (Y_{NO}) do tomateiro cv. Sweet Heaven em função de doses de resíduo sólido de pintado (A) e estádios de desenvolvimento (B). Barras indicam médias $\pm$ EP. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).

Para o quenching fotoquímico (qP), não houve efeito das doses, porém foram observadas diferenças significativas entre os estádios fenológicos (Figura 8).

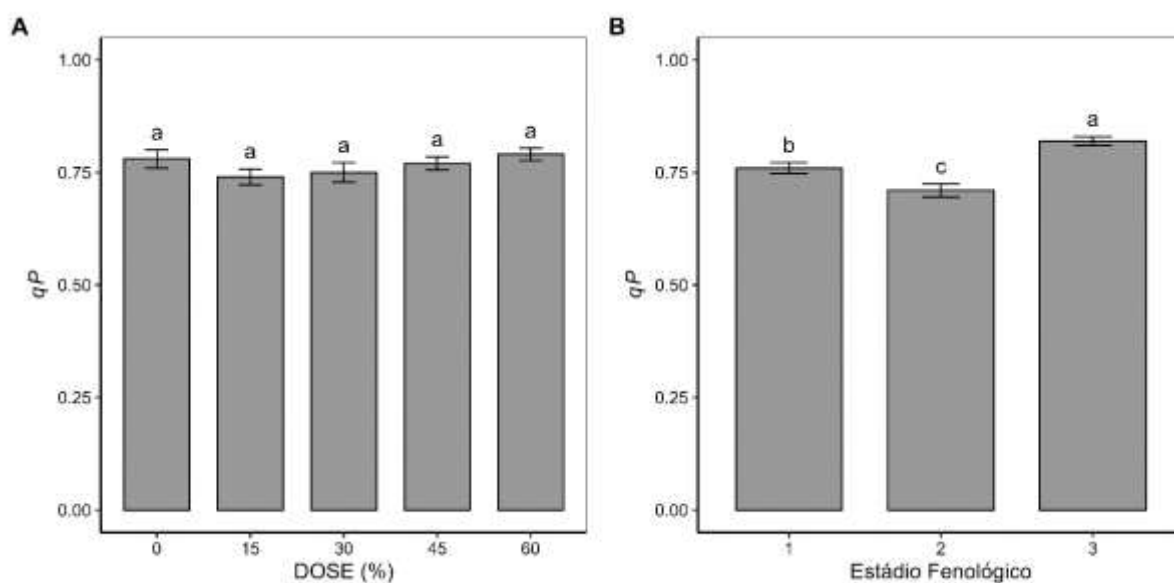


Figura 8 – Coeficiente de quenching fotoquímico (qP) do tomateiro cv. Sweet Heaven em função de doses de resíduo sólido de pintado (A) e estádios de desenvolvimento (B). Barras indicam médias $\pm$ EP. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).

A taxa de transporte de elétrons (ETR) não foi influenciada significativamente pelas doses nem pelos estádios fenológicos (Figura 9).

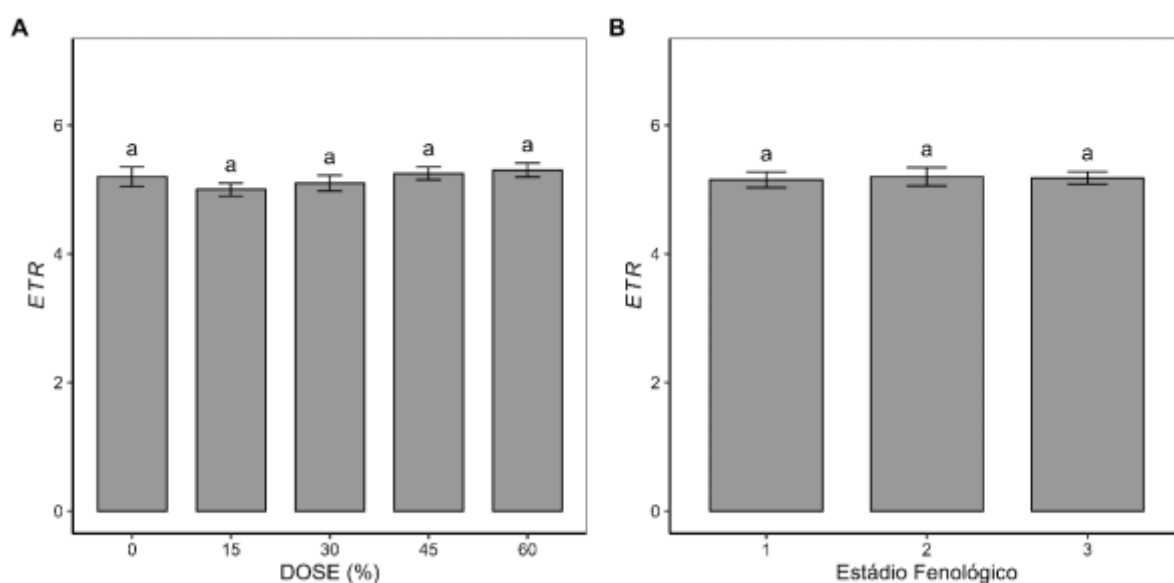


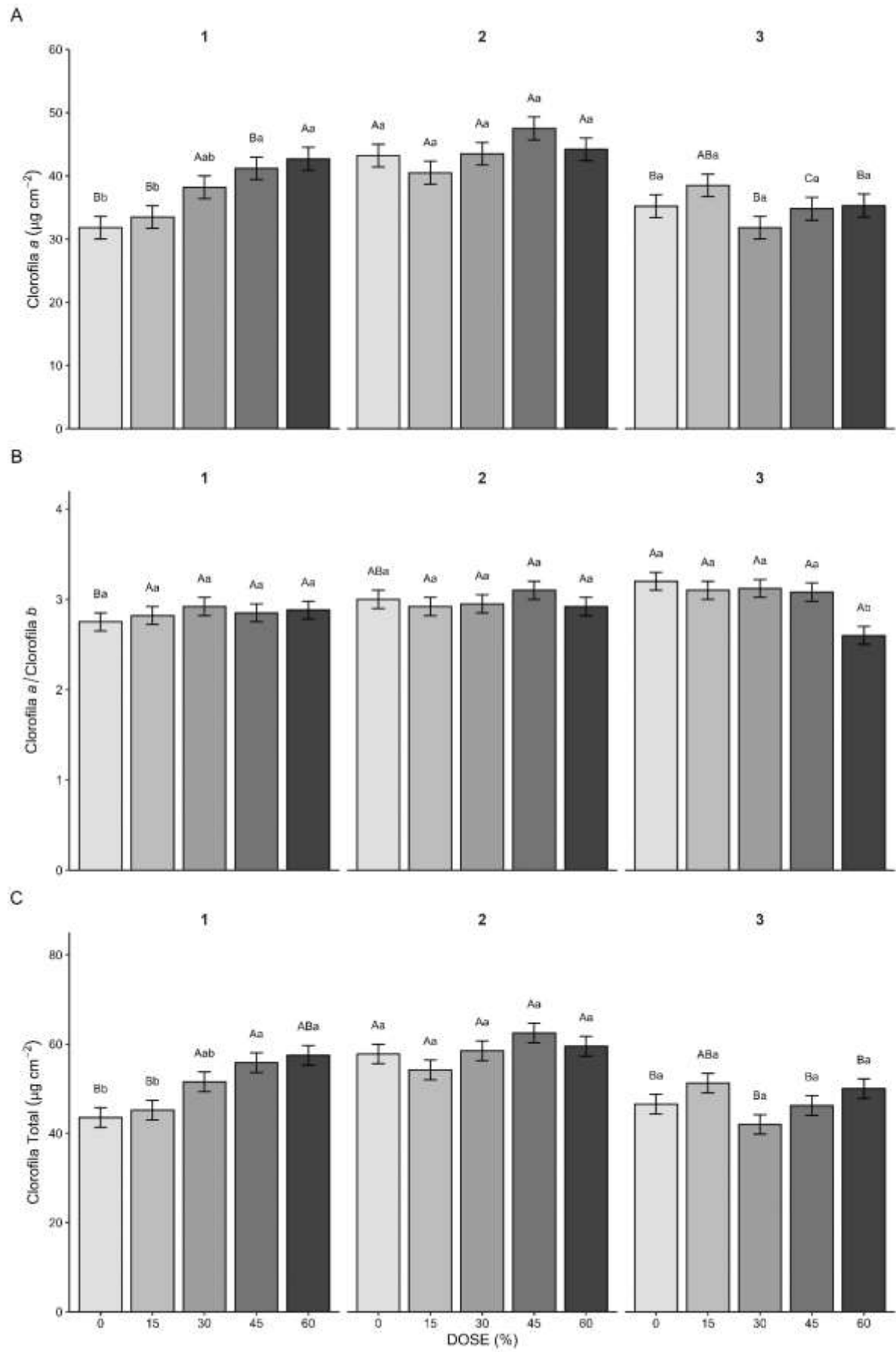
Figura 9 – Taxa de transporte de elétrons (ETR) do tomateiro cv. Sweet Heaven em função de doses de resíduo sólido de pintado (A) e estádios de desenvolvimento (B). Barras indicam

médias $\pm$ EP. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).

3.3. Pigmentos Fotossintéticos

Observou-se interação significativa entre as doses de resíduo e os estádios fenológicos para os teores de clorofila *a*, clorofila total e para a razão clorofila *a/b* (Figura 10). Para a clorofila *a* e clorofila total, o efeito das doses foi mais evidente nos estádios iniciais. No estágio vegetativo, as doses de 45% e 60% elevaram os teores em relação ao controle, enquanto, no estágio de florescimento, a dose de 45% apresentou o maior valor. A razão clorofila *a/b* não foi influenciada pelas doses nos estádios vegetativo e de florescimento, mas apresentou redução significativa na dose de 60% durante a frutificação.

Os teores de clorofila *b* e de carotenoides não apresentaram interação significativa entre os fatores. A clorofila *b* aumentou linearmente com as doses de resíduo (Figura A), enquanto os carotenoides apresentaram ajuste quadrático, com ponto mínimo na dose de 17,5%, indicando aumento em doses mais elevadas (Figura 10). O maior teor de clorofila *b* foi observado no estágio de florescimento (Figura 10).



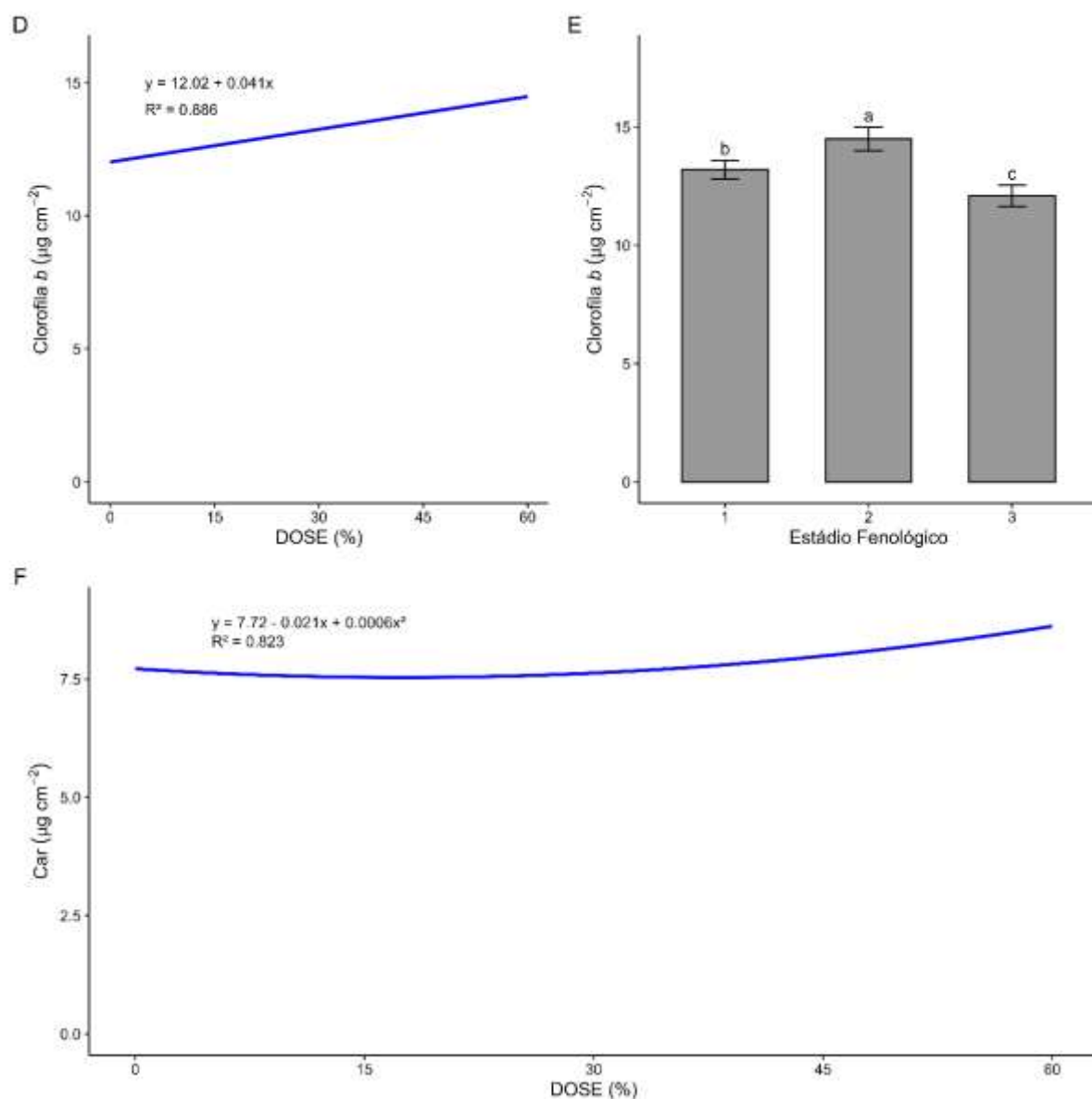


Figura 10 –Teores de pigmentos fotossintéticos em folhas do tomateiro cv. Sweet Heaven em função das doses de resíduo de pintado (0, 15, 30, 45 e 60%) e dos estádios fenológicos (1-Vegetativo, 2-Florescimento, 3-Reprodutivo). (A) Teor de Clorofila a; (B) Teor de Clorofila Total; (C) Razão Clorofila a/b; (D) Análise de regressão para o teor de Clorofila b; (E) Análise de regressão para o teor de Carotenoides; (F) Efeito principal do estágio fenológico sobre o teor de Clorofila b. (A—C) Barras indicam médias $\pm$ EP. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula comparando estádios em cada dose e minúsculas comparando doses para cada estágio e (F) entre os estádios, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$). (F) letras maiúsculas comparam as médias entre os estádios em cada dose. Letras minúsculas

comparam as médias entre as doses em cada estágio. Para as regressões (D e E), os modelos e coeficientes de determinação (R^2) são apresentados nos gráficos.

3.4. Variáveis Morfológicas e de Crescimento

A altura da planta foi influenciada pela interação entre doses e estádios. No desdobramento, o efeito das doses foi significativo apenas no estágio de frutificação, com resposta quadrática e ponto de máxima eficiência estimado na dose de 30,9%. Nos demais estádios, não houve efeito das doses. O crescimento em altura foi progressivo, conforme ao longo do ciclo (frutificação > florescimento > vegetativo) (Figura 11).

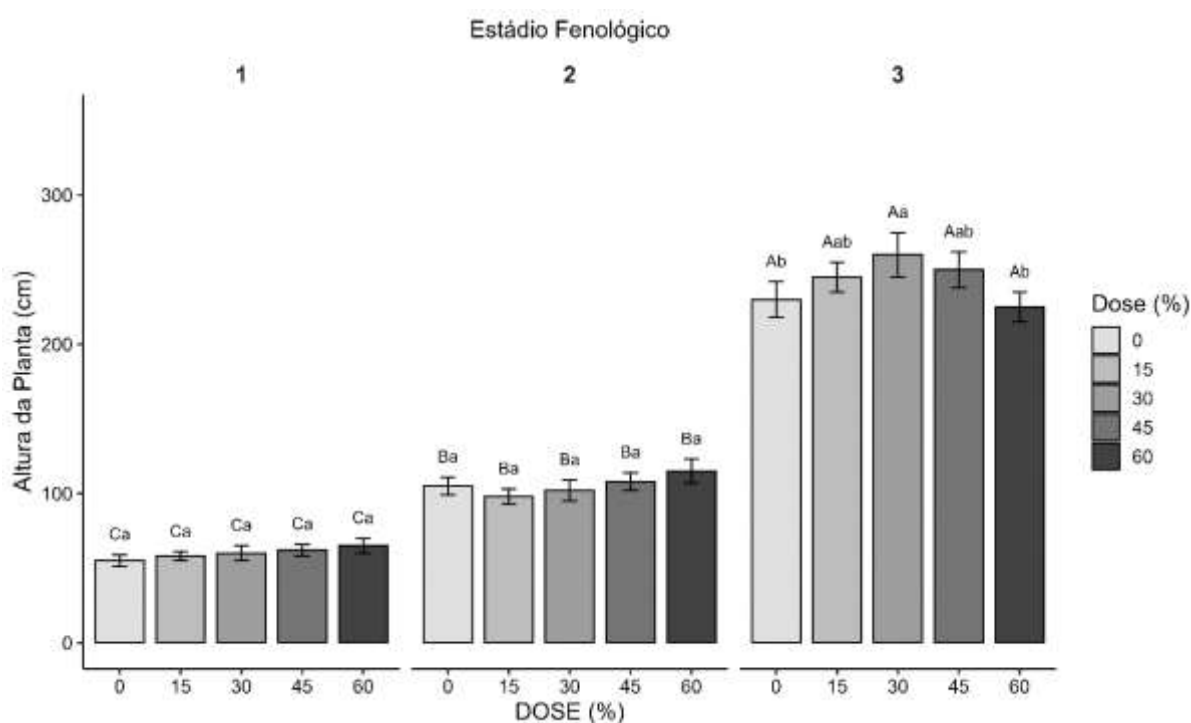


Figura 11 – Gráfico de interação dos fatores dose (%) e estágio fenológico para a variável de altura da planta (cm) do tomateiro cv. Sweet Heaven cultivado com substratos elaborados com 0%, 15%, 30%, 45% e 60% de resíduo sólido de pintado. Barras indicam médias $\pm$ EP. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula comparando o estágio em cada dose e letras minúsculas comparando as doses em cada estágio não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).

O diâmetro do caule foi influenciado de forma independente pelos fatores, com efeito linear positivo das doses e aumento significativo ao longo dos estádios fenológicos (Figura 12).

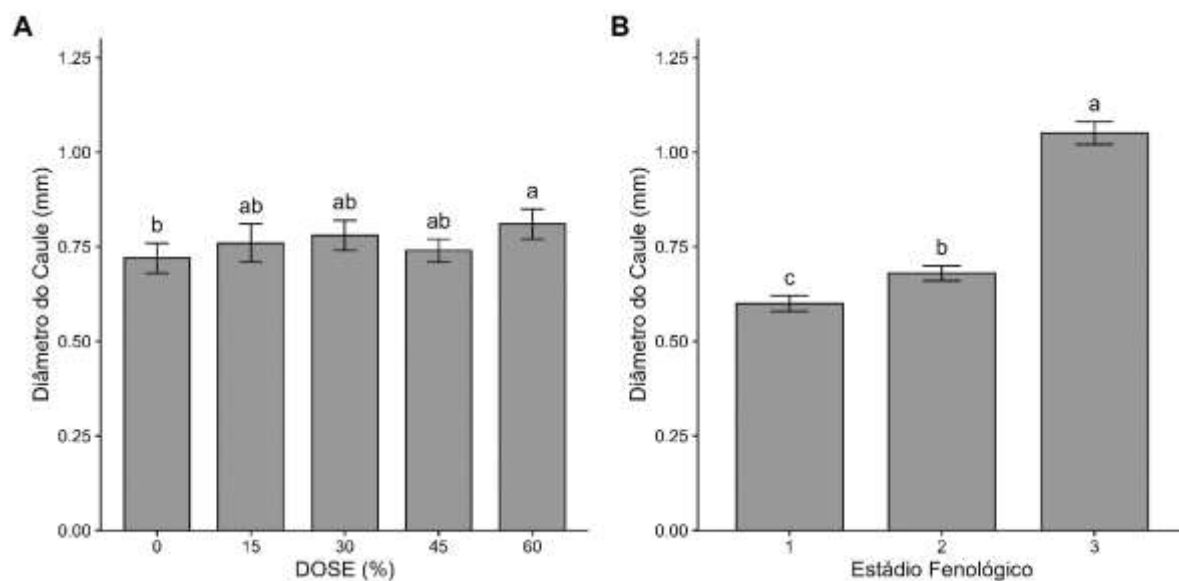


Figura 12 – Efeito isolado das doses de resíduo sólido de pintado (0%, 15%, 30%, 45% e 60%) (A) e dos estádios fenológicos sobre o diâmetro do caule (mm) do tomateiro cv. Sweet Heaven. Barras indicam médias $\pm$ EP. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula comparando o estágio em cada dose e letras minúsculas comparando as doses em cada estágio não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).

O número de folhas e de nós não foi influenciado pelas doses, apresentando apenas efeito dos estádios fenológicos ($p < 0,001$), com incremento ao longo do desenvolvimento da cultura (Figura 13).

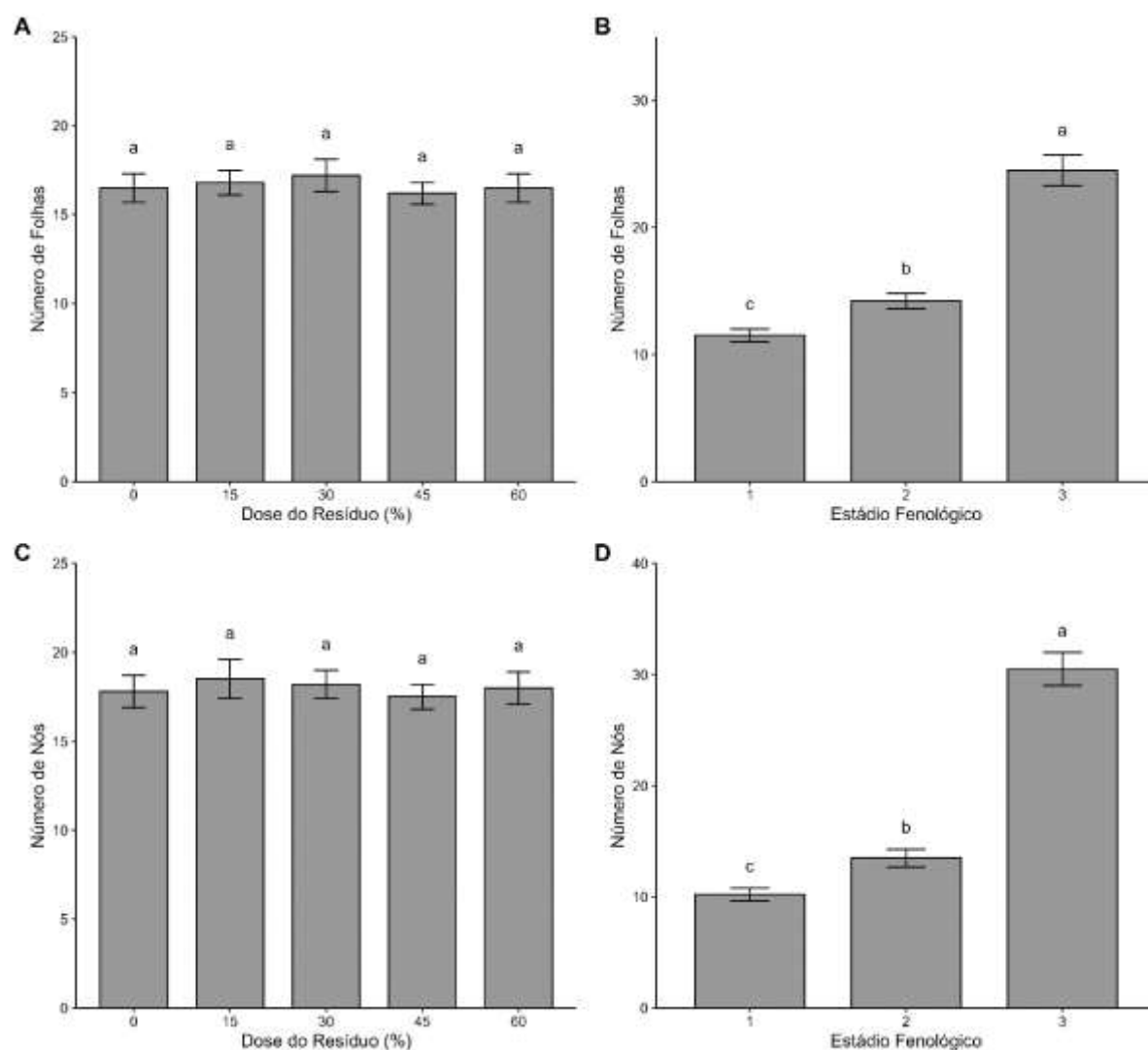


Figura 13 – Número de folhas (A e B) e número de nós (C e D) do tomateiro cv. Sweet Heaven, em função de doses de resíduo sólido de pintado (A e C) e estádios de desenvolvimento (B e D). Barras indicam médias $\pm$ EP. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).

3.5. Variáveis de Produção e Qualidade dos Frutos

3.5.1. Produção de Frutos

As doses do resíduo não influenciaram significativamente o número de frutos por planta, a massa total nem a massa média dos frutos (Figura 14).

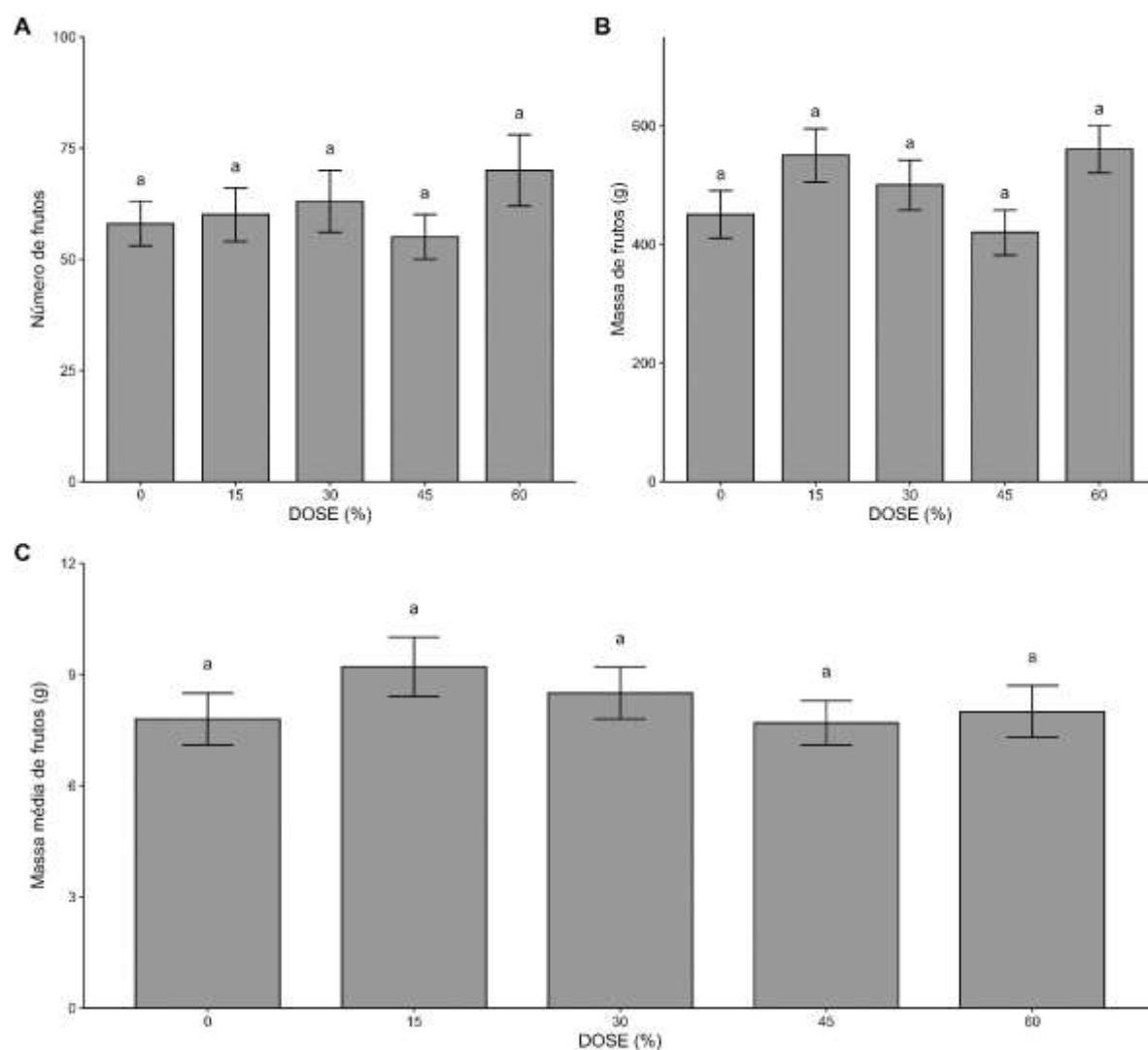


Figura 14 – Variáveis de produção do tomateiro cv. Sweet Heaven em função das doses de resíduo sólido de pintado. A) Número de frutos; B) massa de frutos (g); C) Massa média dos frutos (g). Barras indicam médias $\pm$ EP. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).

3.5.2. Qualidade Físico-Química dos Frutos

A acidez titulável e o pH não foram afetados pelos tratamentos. Por outro lado, o teor de sólidos solúveis ($^{\circ}$ Brix) foi significativamente maior na dose de 30%, destacando-se em relação às demais (Figura 15).

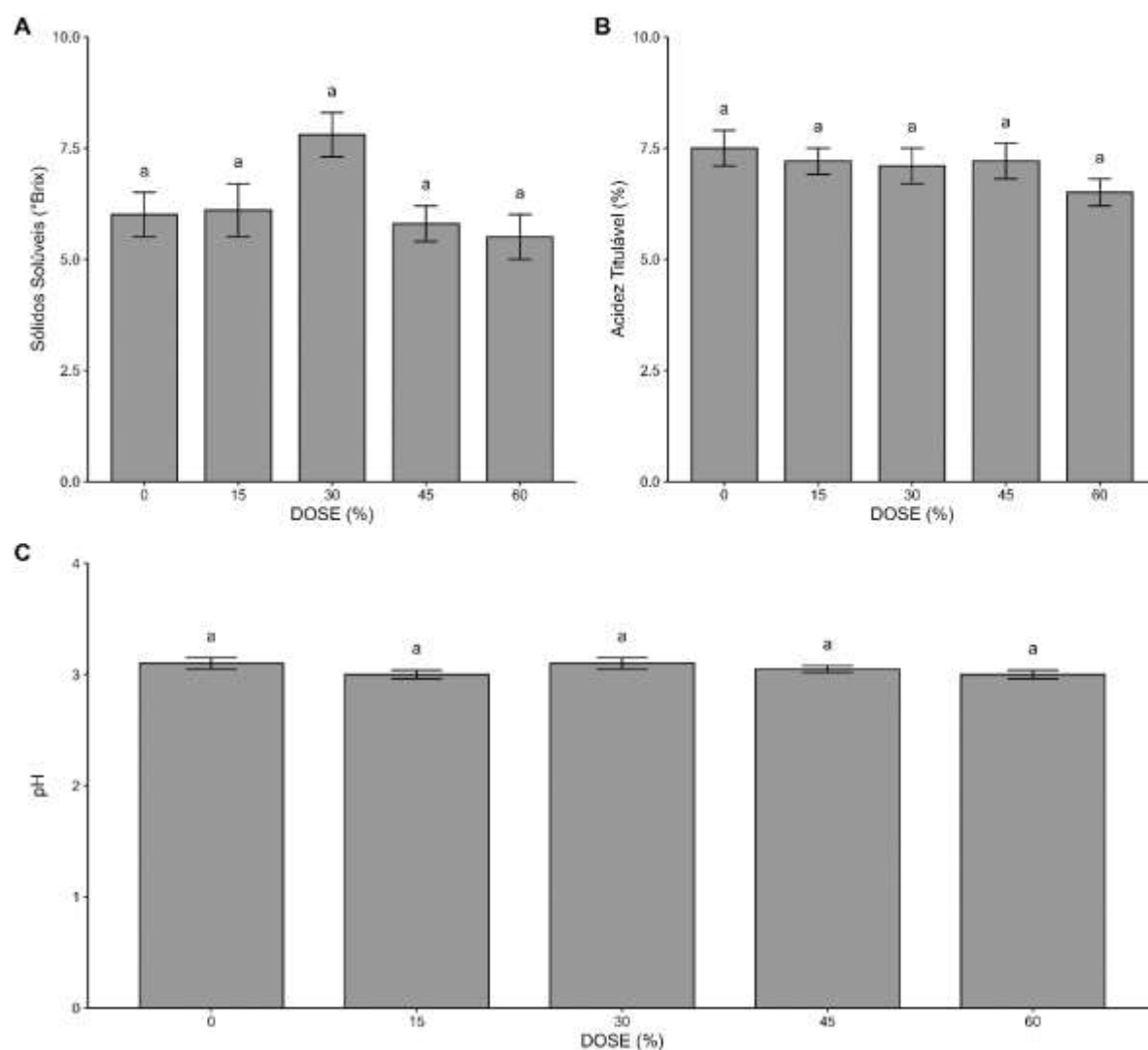
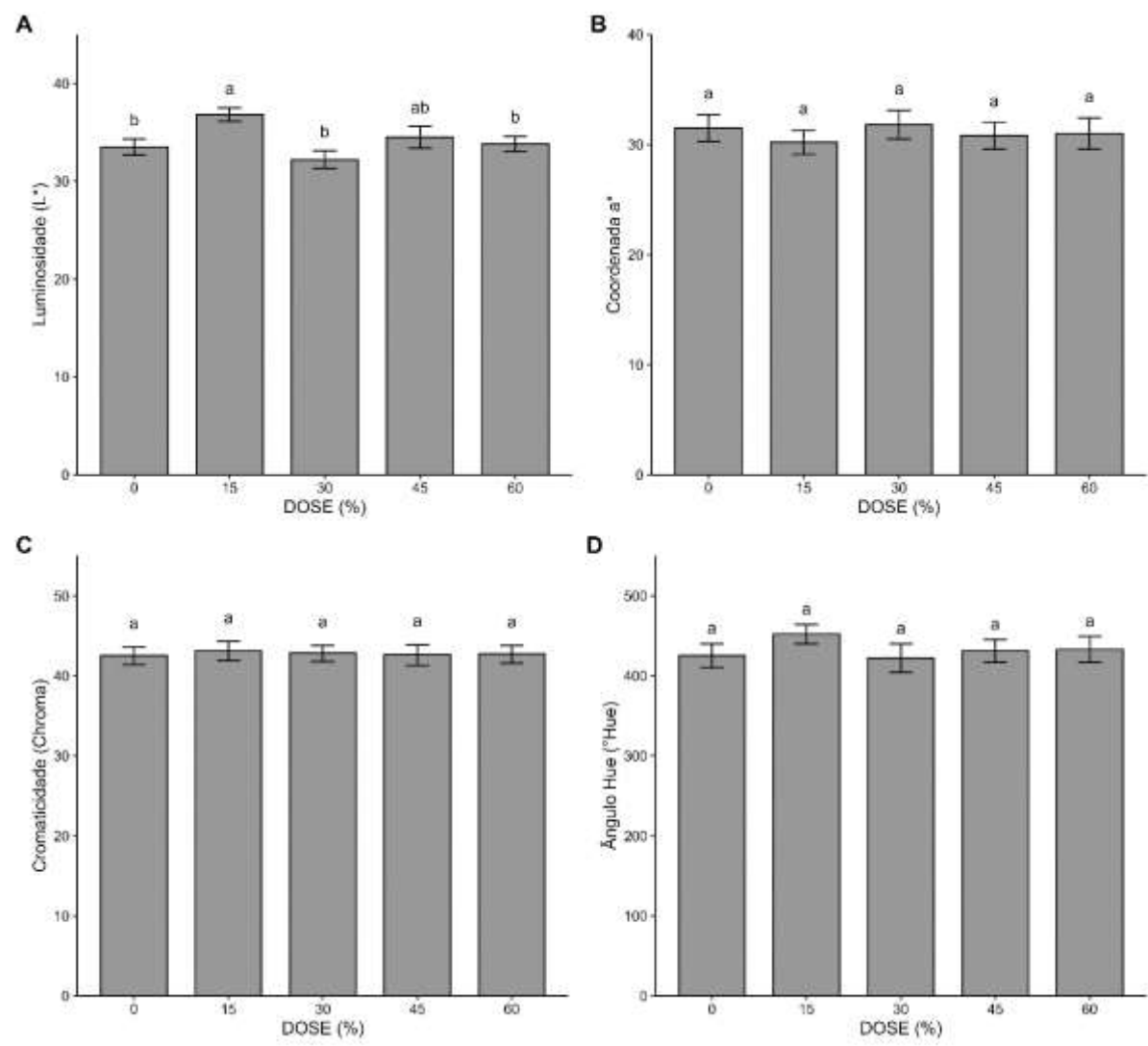


Figura 15 – Variáveis de qualidade físico-química de frutos do tomateiro cv. Sweet Heaven em função das doses de resíduo sólido de pintado. A) sólidos solúveis (°Brix); B) acidez titulável (%); C) pH. Barras indicam médias $\pm$ EP. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).

3.5.3. Coloração da Polpa dos Frutos

Os parâmetros de coloração da polpa (coordenada a^* , croma e $^{\circ}\text{HUE}$) não foram influenciados pelas doses. A luminosidade (L^*) apresentou valor máximo na dose de 15%, indicando polpa ligeiramente mais clara neste tratamento (Figura 16).



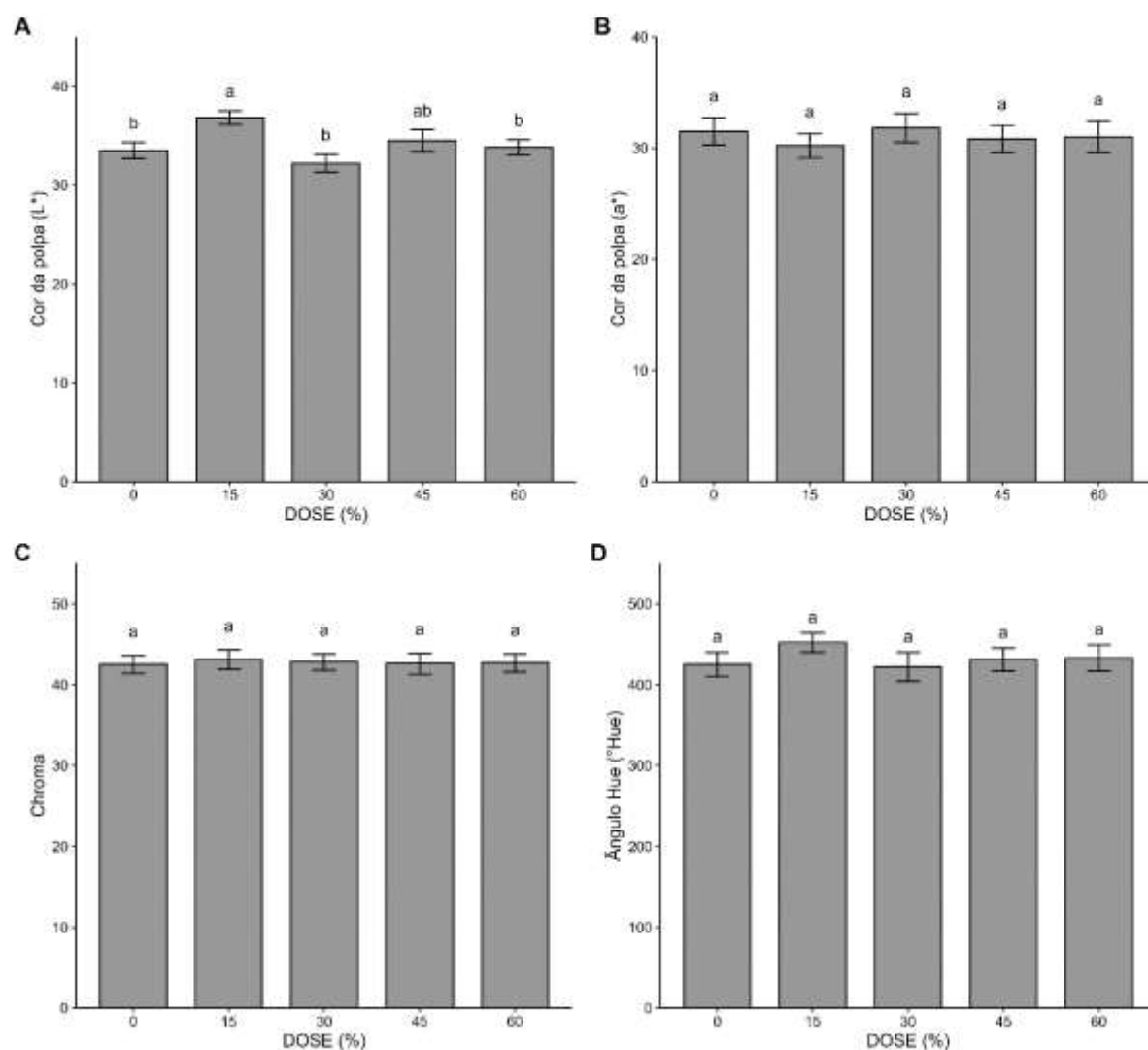


Figura 16 – Parâmetros de coloração da polpa de frutos do tomateiro cv. Sweet Heaven em função das doses de resíduo sólido de pintado. (A) Luminosidade (L*). (B) Coordenada a*. (C) Croma. (D) Ângulo Hue (°HUE). Barras indicam médias $\pm$ EP. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).

3.6. Metabolismo Antioxidativo e Dano Celular

Foi observada interação significativa ($p < 0,05$) entre doses de resíduo e estádios fenológicos para os teores de malondialdeído (MDA) e para as atividades das enzimas superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT) e guaiacol peroxidase (POX), indicando respostas dependentes da combinação desses fatores (Figura 17).

Os teores de MDA variaram entre os estádios: no vegetativo, a dose de 60% promoveu aumento significativo; no florescimento, as doses de 30% e 45% reduziram o dano oxidativo

em relação ao controle; e, na frutificação, o controle apresentou maior teor de MDA (Figura 17).

A atividade da SOD permaneceu estável no estágio vegetativo, mas foi estimulada pelas doses de 30% e 60% (Figura 17). Na frutificação, houve aumento progressivo com as doses, com pico na dose de 45%.

A atividade da CAT apresentou comportamento distinto entre os estádios: aumento em doses elevadas no vegetativo, redução no florescimento em relação ao controle, e maior atividade na dose de 15% na frutificação, com declínio nas doses superiores (Figura 17).

A atividade da POX foi baixa nos estádios vegetativo e de florescimento, porém aumentou expressivamente na frutificação, apresentando resposta positiva e dependente da dose de resíduo (Figura 17).

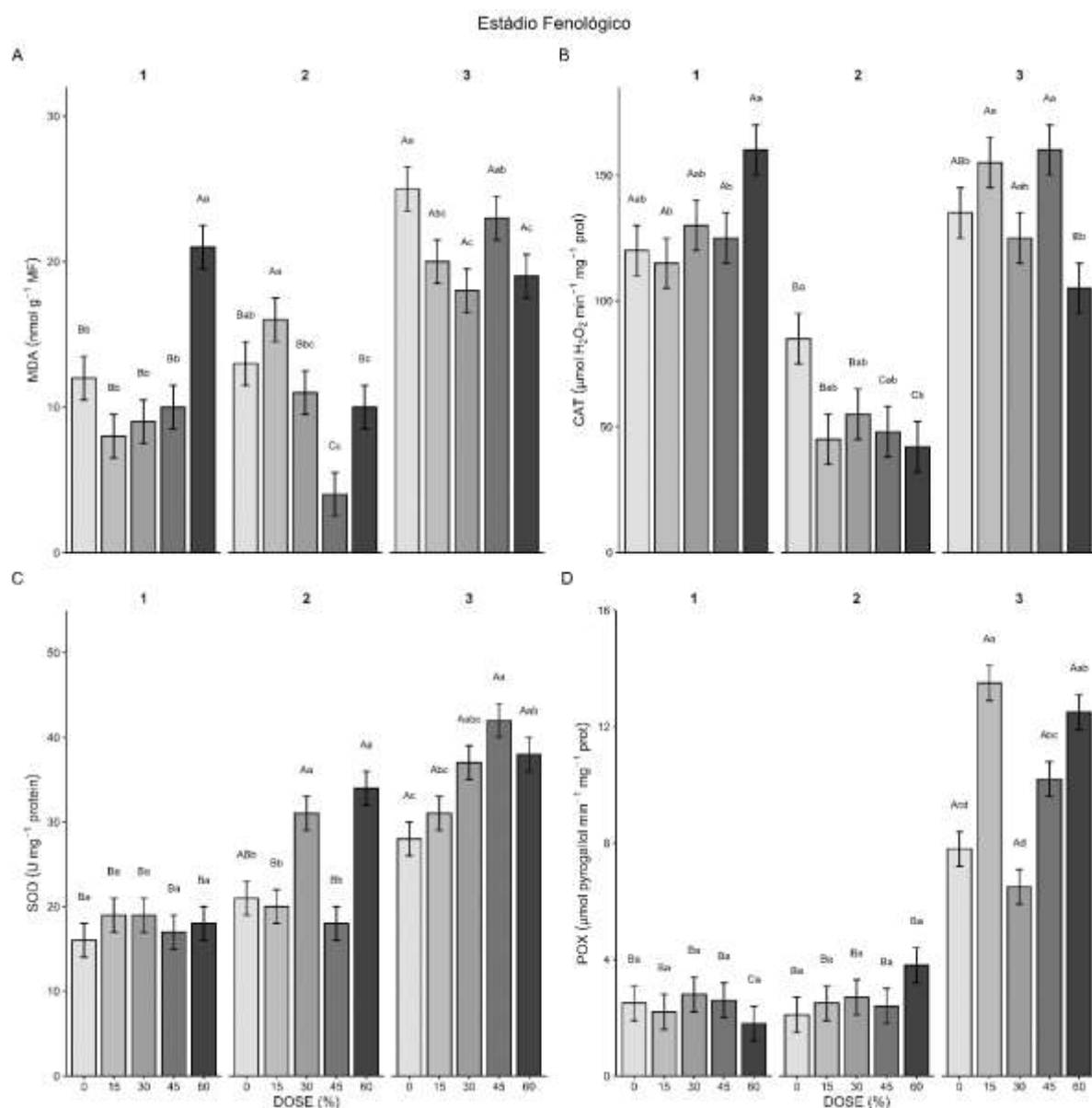


Figura 17 –Metabolismo antioxidativo e dano celular do tomateiro cv. Sweet Heaven, apresentando a interação entre doses de resíduo sólido de pintado e estádios de desenvolvimento. (A) Teores de malonaldeído (MDA); (B) Atividade da Superóxido Dismutase (SOD); (C) Atividade da catalase (CAT); (D) Atividade da guaiacol peroxidase (POX). Barras indicam médias $\pm$ EP. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula comparando o estágio em cada dose e letras minúsculas comparando as doses em cada estágio não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).

4. Discussão

A crescente demanda por práticas agrícolas sustentáveis tem impulsionado a busca por alternativas aos fertilizantes químicos, cuja produção e uso excessivo estão associados a impactos ambientais significativos, como a eutrofização de corpos hídricos, emissões de gases de efeito estufa e degradação do solo (SAMORAJ *et al.*, 2022). Nesse contexto, os biofertilizantes derivados de resíduos da aquicultura surgem como solução promissora, promovendo a reciclagem de nutrientes e mitigação dos passivos ambientais gerados pelo descarte inadequado desses resíduos (NOORJAHAN, 2021; BROD *et al.*, 2023)

A capacidade do biofertilizante em nutrir as plantas foi notável pelo impacto positivo sobre o aparato fotossintético e o crescimento vegetal. O aumento linear na taxa fotossintética líquida, do diâmetro do caule e nos teores de pigmentos fotossintéticos (clorofila *b* e carotenóides) reforça o papel do resíduo como fonte eficaz de macro e micronutrientes, especialmente nitrogênio, fósforo e potássio, além de atuar como condicionador físico-químico do substrato. BROD *et al.*, (2023) destacam que resíduos de peixe são fontes ricas em macronutrientes como N, P e K, bem como em matéria orgânica e micronutrientes. O comportamento linear crescente observado para a taxa fotossintética e o teor de clorofila *b* indica que, no intervalo de doses testado, não houve saturação da resposta da planta, sugerindo ausência de toxicidade.

O incremento linear nos teores de clorofila e no diâmetro do caule está diretamente relacionado à disponibilidade de N fornecido pelo resíduo. Embora o teor de N total do resíduo seja de 0,1%, a elevada relação C/N (38:1) indica mineralização gradual. Diferentemente das fontes minerais prontamente solúveis, essa liberação lenta permitiu um suprimento constante de N ao longo do ciclo, evitando perdas por lixiviação e favorecendo a síntese contínua de pigmentos fotossintéticos e proteínas estruturais. Esse mecanismo explica a manutenção do vigor vegetativo, mesmo em condições de redução da adubação química.

A manutenção da atividade metabólica é corroborada pela análise das trocas gasosas. A resposta quadrática da razão C_i/C_a , com redução observada nas doses mais elevadas, deve ser interpretada em conjunto com o comportamento linear crescente da fotossíntese. O fato da concentração interna de CO_2 (C_i) ter caído nos tratamentos com mais fotossíntese indica boa eficiência de carboxilação. Isso mostra que a enzima Rubisco trabalhou mais rápido, consumindo o CO_2 de dentro da folha numa velocidade maior do que a entrada pelos estômatos (FARQUHAR; SHARKEY, 1982). Esse resultado prova que não houve travamento do metabolismo e que a planta criou um dreno de carbono forte para conseguir crescer (LONG; BERNACCHI, 2003).

Adicionalmente, a matéria orgânica proveniente do resíduo contribui para a melhoria da estrutura do substrato, aumentando a capacidade de retenção de água e estimulando a atividade microbiana, favorecendo a mineralização e disponibilidade de nutrientes essenciais para o desenvolvimento vegetal (PANDEY *et al.*, 2025; CHEN *et al.*, 2021; HOLATKO *et al.*, 2025). Resultados similares foram reportados por Anli *et al.*, (2020), que observaram melhorias na eficiência fotossintética e na condutância estomática em plantas tratadas com biofertilizantes. O nitrogênio, como componente estrutural da clorofila e de enzimas do ciclo de Calvin, está diretamente associado ao aumento da capacidade fotossintética, enquanto o fósforo atua no metabolismo energético e o potássio na regulação estomática (WANG *et al.*, 2024; DUTTA; DRACATOS; KHAN, 2024). Assim, o resíduo atuou tanto como fonte nutricional quanto como condicionador do substrato, promovendo um ambiente mais favorável ao desenvolvimento vegetal em comparação à adubação exclusivamente mineral.

Entretanto, respostas fisiológicas variáveis com o aumento das doses indicam a existência de um limiar ótimo, acima do qual o resíduo pode induzir estresse oxidativo, evidenciado pelo aumento dos teores de malondialdeído, especialmente nos estádios iniciais da cultura. Esse estresse pode estar associado ao excesso de solutos e ao desequilíbrio iônico decorrente da mineralização da matéria orgânica, conforme observado em estudos anteriores (OLIVEIRA *et al.*, 2024; NOORJAHAN, 2021). A ativação das enzimas antioxidantes, como catalase e superóxido dismutase, demonstra a capacidade adaptativa das plantas em mitigar os efeitos do estresse (CHAKI *et al.*, 2025; GILL; TUTEJA, 2010).

O estágio fenológico exerceu influência determinante nas respostas fisiológicas, refletindo a dinâmica de alocação de recursos ao longo do ciclo da cultura. A transição do estágio vegetativo para o reprodutivo implica maior demanda energética, com órgãos reprodutivos atuando como drenos prioritários de fotoassimilados, além da indução de processos de senescência foliar. Embora tenha sido observada redução na eficiência quântica

máxima do fotossistema II (F_v/F_m), os valores mantiveram-se próximos à faixa funcional, indicando regulação fisiológica e não dano irreversível (SUBHANI *et al.*, 2023). O comportamento quadrático do rendimento quântico efetivo sugere ajuste temporário na eficiência do transporte de elétrons, seguido de recuperação em doses mais altas, evidenciando a plasticidade fisiológica do tomateiro. Para lidar com o excesso de energia luminosa e o estresse oxidativo, as plantas ativaram mecanismos fotoprotetores, como a dissipação de energia não fotoquímica (via calor) e o aumento da atividade de enzimas antioxidantes, especialmente SOD e POX (SHOMALI *et al.*, 2024; CHEN *et al.*, 2021).

Apesar dos ganhos em parâmetros fisiológicos e no crescimento vegetativo, a ausência de aumento significativo na produção de frutos evidencia a complexidade do rendimento agrícola, que depende da interação entre fatores genéticos, fisiológicos e ambientais (SILVA *et al.*, 2019; MAO *et al.*, 2024). Por outro lado, o aumento significativo dos sólidos solúveis totais (°Brix), observado na dose de 30%, indica melhoria na qualidade dos frutos, com implicações positivas para o sabor e a indústria de processamento PERVEEN *et al.*, 2015; CRUZ-CHAMORRO *et al.*, 2024b). Esse efeito pode ser atribuído ao fornecimento equilibrado de K e micronutrientes como o B, presentes no biofertilizante. O K desempenha papel fundamental no carregamento do floema e na translocação de fotoassimilados (açúcares) das folhas para os frutos. O resíduo de pintado, ao fornecer K associado à matéria orgânica, pode ter otimizado a disponibilidade deste cátion na solução do solo, reduzindo a fixação e potencializando o acúmulo de açúcares no fruto (SILVA *et al.*, 2019).

Estudos com resíduos de aquicultura em diferentes culturas reforçam os benefícios agronômicos e ambientais desses bioinsumos, destacando seu potencial de aplicação em sistemas sustentáveis e de economia circular (NOORJAHAN, 2021; BROD *et al.*, 2023). Além disso, seu uso pode promover melhorias na microbiota do solo e na saúde do agroecossistema a longo prazo (HOLATKO *et al.*, 2025).

A recomendação de uso do resíduo na faixa de 30-45%, associada à adubação complementar, é consistente com os resultados obtidos, evidenciando a eficácia e segurança agronômica. No entanto, estudos adicionais a longo prazo, envolvendo diferentes cultivares e condições edafoclimáticas, são necessários para consolidar as recomendações de manejo (PANDEY *et al.*, 2025; CHEN *et al.*, 2021).

5. Conclusão

A substituição parcial da adubação química pelo resíduo sólido de pintado demonstrou que o uso integrado de fertilizantes orgânicos e minerais é viável e benéfico para o cultivo do tomateiro cv. Sweet Heaven, melhorando o status fisiológico e metabólico da cultura.

O uso do resíduo como substituto parcial na composição do substrato promoveu aumento linear na taxa fotossintética e no diâmetro do caule, indicando melhoria efetiva na nutrição e no vigor geral das plantas. A faixa de dose ótima situou-se entre 30% e 45% de substituição, com destaque para a dose de 30%, que proporcionou o maior teor de sólidos solúveis totais (°Brix), ganho significativo na qualidade dos frutos e otimizou a altura da planta. Os efeitos dos tratamentos foram dependentes do estágio fenológico, sendo que a dose de 60% induziu estresse oxidativo na fase vegetativa, enquanto doses intermediárias (30-45%) mostraram-se benéficas ao reduzir o dano celular no florescimento.

Conclui-se que o resíduo é um insumo promissor e sustentável, recomendado na faixa de 30% a 45% para melhorar o vigor da planta e, principalmente a qualidade dos frutos do tomateiro cv. Sweet Heaven, embora não tenha alterado a produtividade quantitativa sob as condições deste experimento. Recomenda-se o uso integrado do resíduo à adubação de cobertura principalmente nos estádios mais avançados do tomateiro (florescimento e frutificação) para manutenção ou aumento da produtividade e investigação aprofundada por período mais longo da frutificação para verificação do real potencial em todo o ciclo da cultura.

6. Referências Bibliográficas

- ANDERSON, M. D.; PRASAD, T. K.; STEWART, C. R. Changes in Isozyme Profiles of Catalase, Peroxidase, and Glutathione Reductase during Acclimation to Chilling in Mesocotyls of Maize Seedlings. *Plant Physiology*, v. 109, n. 4, p. 1247–1257, 1 dez. 1995.
- ANLI, M.; BASLAM, M.; TAHIRI, A.; RAKLAMI, A.; SYMANCZIK, S.; BOUTASKNIT, A.; AIT-EL-MOKHTAR, M.; BEN-LAOUANE, R.; TOUBALI, S.; AIT RAHOU, Y.; AIT CHITT, M.; OUFDOU, K.; MITSUI, T.; HAFIDI, M.; MEDDICH, A. Biofertilizers as Strategies to Improve Photosynthetic Apparatus, Growth, and Drought Stress Tolerance in the Date Palm. *Frontiers in Plant Science*, v. 11, 23 out. 2020.
- BEAUCHAMP, C.; FRIDOVICH, I. Superoxide dismutase: Improved assays and an assay applicable to acrylamide gels. *Analytical Biochemistry*, v. 44, n. 1, p. 276–287, nov. 1971.

- BILGER, W.; SCHREIBER, U.; BOCK, M. Determination of the quantum efficiency of photosystem II and of non-photochemical quenching of chlorophyll fluorescence in the field. *Oecologia*, v. 102, p. 425–432, 1995.
- BRADFORD, M. M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*, v. 72, n. 1–2, p. 248–254, maio 1976.
- BROD, E.; HENRIKSEN, T. M.; ØRNSRUD, R.; EGGEN, T. Quality of fish sludge as fertiliser to spring cereals: Nitrogen effects and environmental pollutants. *Science of the Total Environment*, v. 875, 1 jun. 2023.
- CHAKI, M.; ARANDA-CAÑO, L.; BEGARA-MORALES, J. C.; SÁNCHEZ-CALVO, B.; LÓPEZ-JARAMILLO, F. J.; PADILLA, M. N.; VALDERRAMA, R.; PEDRAJAS, J. R.; BARROSO, J. B. Nitro-fatty acids-mediated nitroalkylation modulates fine-tuning catalase antioxidant function during salinity stress in plants. *Protein Science*, v. 34, n. 3, 1 mar. 2025.
- MAEHLY, A. C. The Assay of Catalases and Peroxidases. Em: [s.l: s.n.]p. 357–424.
- CHEN, X.; ZHOU, Y.; CONG, Y.; ZHU, P.; XING, J.; CUI, J.; XU, W.; SHI, Q.; DIAO, M.; LIU, H. Y. Ascorbic Acid-Induced Photosynthetic Adaptability of Processing Tomatoes to Salt Stress Probed by Fast OJIP Fluorescence Rise. *Frontiers in Plant Science*, v. 12, 16 ago. 2021.
- CRUZ-CHAMORRO, I.; SANTOS-SÁNCHEZ, G.; MARTÍN, F.; FERNÁNDEZ-PACHÓN, M. S.; HORNERO-MÉNDEZ, D.; CERRILLO, I. Evaluation of the Impact of the Ripening Stage on the Composition and Antioxidant Properties of Fruits from Organically Grown Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) Spanish Varieties. *Foods*, v. 13, n. 15, 1 ago. 2024.
- DAS, P.; PENTON, C. R.; BI, Y.; WESTERHOFF, P. Unraveling mechanisms behind reduced nitrate leaching with graphite nanomaterials addition with fertilizers in soil column experiments. *Chemosphere*, v. 337, 1 out. 2023.
- DUTTA, A.; DRACATOS, P. M.; KHAN, G. A. Balancing act: The dynamic relationship between nutrient availability and plant defence *Plant Journal* John Wiley and Sons Inc, 1 dez. 2024.
- EHLERINGER, J. Leaf Absorptances of Mohave and Sonoran Desert Plants. *Oecologia (Berl)*, p. 370, 1981.
- FARQUHAR, G. D.; SHARKEY, T. D. Stomatal conductance and photosynthesis. *Annual Review of Plant Physiology*, v. 33, n. 1, p. 317–345, 1982.

- GENTY, B.; BRIANTAIS, J. M.; BAKER, N. R. The relationship between the quantum yield of photosynthetic electron transport and quenching of chlorophyll fluorescence. *Biochimica et Biophysica Acta - General Subjects*, v. 990, n. 1, p. 87–92, 1989.
- GIANNOPOLITIS, C. N.; RIES, S. K. Superoxide Dismutases. *Plant Physiology*, v. 59, n. 2, p. 309–314, 1 fev. 1977.
- GILL, S. S.; TUTEJA, N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants *Plant Physiology and Biochemistry* dez. 2010.
- GO, Y. S.; KIM, C. S.; LEE, W. C.; LEE, D. H. A stable isotopic approach for quantifying aquaculture-derived organic matter deposition dynamics in the sediment of a coastal fish farm. *Marine Pollution Bulletin*, v. 192, 1 jul. 2023.
- HAVIR, E. A.; MCHALE, N. A. Biochemical and Developmental Characterization of Multiple Forms of Catalase in Tobacco Leaves. *Plant Physiology*, v. 84, n. 2, p. 450–455, 1 jun. 1987.
- HEATH, R. L.; PACKER, L. Photoperoxidation in isolated chloroplasts. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, v. 125, n. 1, p. 189–198, abr. 1968.
- HOLATKO, J.; KUCERIK, J.; MUSTAFA, A.; LONOVA, K.; SIDDIQUI, M. H.; NAVEED, M.; HAMMERSCHMIEDT, T.; KINTL, A.; MALICEK, O.; CHORAZY, T.; BALTAZAR, T.; BRTNICKY, M. Influence of biochar feedstock blends on soil enzyme activity, nutrient cycling, lettuce biomass accumulation and photosynthesis. *BMC Plant Biology*, v. 25, n. 1, 1 dez. 2025.
- KAR, M.; MISHRA, D. Catalase, Peroxidase, and Polyphenoloxidase Activities during Rice Leaf Senescence. *Plant Physiology*, v. 57, n. 2, p. 315–319, 1 fev. 1976.
- KOSHELEVA, N.; EFIMOVA, L.; EFIMOV, V.; SYCHEVA, D. Potentially toxic elements in the Gusinoye Lake (Republic of Buryatia, Russia). *Environmental Science and Pollution Research*, v. 29, n. 51, p. 77593–77608, 1 nov. 2022.
- KRAMER, D. M.; JOHNSON, G.; KIIRATS, O.; EDWARDS, G. E. New fluorescence parameters for the determination of QA redox state and excitation energy fluxes. *Photosynthesis Research*, v. 79, n. 2, p. 209–218, 2004. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1023/B:PRES.0000015391.99477.0d>.
- KURASAWA, A.; ONISHI, Y.; KOBAYASHI, K.; FUKUSHIMA, K.; UNO, H. Sequential migrations of diverse fish community provide seasonally prolonged and stable nutrient inputs to a river. *Sci. Adv*, v. 10, p. 945, 2024. Disponível em: <https://www.science.org>.

- LAISK, A.; LORETO, F. Determining Photosynthetic Parameters from Leaf CO₂ Exchange and Chlorophyll Fluorescence Ribulose-1,5-Bisphosphate Carboxylase/Oxygenase Specificity Factor, Dark Respiration in the Light, Excitation Distribution between Photosystems, Alternative Electron Transport Rate, and Mesophyll Diffusion Resistance. *Plant Physiol.*, v. 110, 1996. Disponível em: <<https://academic.oup.com/plphys/article/110/3/903/6070074>>.
- LEANDRO, S. V.; ITUASSÚ, D. R.; SINHORIN, V. D. G.; AGUIAR, D. H.; MOREIRA, P. S. A.; FERNEDA, A. J. L. B.; MARQUES, S. A. D.; SINHORIN, A. P.; CORASSA, A.; TON, A. P. S.; FREITAS, L. W. de; SBARDELLA, M. Effect of Dietary Digestible Protein Levels on Muscle Growth and Oxidative Stress in Amazonian Pintado (*Pseudoplatystoma reticulatum* × *Leiarius marmoratus*). *Biology*, v. 13, n. 10, 1 out. 2024.
- LONG, S. P.; BERNACCHI, C. J. Gas exchange measurements, what can they tell us about the limitations of photosynthesis? In vivo analysis. *Journal of Experimental Botany*, v. 54, n. 392, p. 2393-2401, 2003.
- MALAVOLTA, E. Elementos de nutrição mineral de plantas. [s.l: s.n.]1–251 p.
- MAO, X.; GU, J.; WANG, F.; WANG, K.; LIU, R.; HONG, Y.; WANG, Y.; HAN, F. Yield, Quality, and Nitrogen Leaching of Open-Field Tomato in Response to Different Nitrogen Application Measures in Northwestern China. *Plants*, v. 13, n. 7, 1 abr. 2024.
- MARQUES, S. A. D. A.; ITUASSÚ, D. R.; MEURER, F.; FILHO, R. A. C. C.; POVH, J. A.; SINHORIN, V. D. G. Digestible protein requirement of Amazonian pintado (*Pseudoplatystoma reticulatum* × *Leiarius marmoratus*) *Aquaculture International* Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 1 fev. 2025.
- NOORJAHAN, C. M. Synthesis Of Bio Fertilizer Using Fish Waste And Its Utilization-An Eco-Friendly Approach. *Webology*, v. 18, n. 3, p. 2021, 2021. Disponível em: <<http://www.webology.org>>.
- NOVAIS, R. N. J. e B. N. Ensaio em ambiente controlado. In: Oliveira, AJ, Garrido, WE, Araújo, JD e Lourenço, S., Coord., Métodos de pesquisa em fertilidade do solo. EMBRAPA, v. 2, p. 189–198, 1991.
- OLIVEIRA, L. M.; MENDONÇA, V.; MOURA, E. A.; IRINEU, T. H. S.; FIGUEIREDO, F. R. A.; MELO, M. F.; CELEDONIO, W. F.; RÊGO, A. L. B.; MENDONÇA, L. F. M.; ANDRADE, A. D. M. Salt stress and organic fertilization on the growth and biochemical metabolism of *Hylocereus costaricensis* (red pitaya) seedlings. *Brazilian Journal of Biology*, v. 84, 2024.

- OTONI, B. da S.; MOTA, W. F. da; BELFORT, G. R.; SILVA, A. R. S.; VIEIRA, J. C. B.; ROCHA, L. de S. Produção de híbridos de tomateiro cultivados sob diferentes porcentagens de sombreamento. *Revista Ceres*, v. 59, n. 6, p. 816–825, 2012.
- PANDEY, A. K.; THAKUR, S.; MEHRA, R.; KALER, R. S. S.; PAUL, M.; KUMAR, A. Transforming Agri-food waste: Innovative pathways toward a zero-waste circular economy *Food Chemistry: X* Elsevier Ltd, 1 maio 2025.
- PERVEEN, R.; SULERIA, H. A. R.; ANJUM, F. M.; BUTT, M. S.; PASHA, I.; AHMAD, S. Tomato (*Solanum lycopersicum*) Carotenoids and Lycopenes Chemistry; Metabolism, Absorption, Nutrition, and Allied Health Claims—A Comprehensive Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, v. 55, n. 7, p. 919–929, 7 jun. 2015.
- RONEN, R.; GALUN, M. PIGMENT EXTRACTION FROM LICHENS WITH DIMETHYL SULFOXIDE (DMSO) AND ESTIMATION OF CHLOROPHYLL DEGRADATION. *Environmental and Experimental Botany*, v. 24, n. 3, p. 23–245, 1984.
- SAMORAJ, M.; MIRONIUK, M.; WITEK-KROWIAK, A.; IZYDORCZYK, G.; SKRZYPCZAK, D.; MIKULA, K.; BAŚLADYŃSKA, S.; MOUSTAKAS, K.; CHOJNACKA, K. Biochar in environmental friendly fertilizers - Prospects of development products and technologies. *Chemosphere*, v. 296, 1 jun. 2022.
- SANTOS, J. T.; GUIMARÃES, J. C. S.; FRANCO, A.; CORDEIRO, J.; ALVARENGA, C.; SANTOS, C. I. F. dos; THEREZO, P. Resíduos Sólidos Orgânicos: Uma Análise Cienciométrica Acerca da Utilização da Compostagem Para a Geração de Adubo. *Research, Society and Development*, v. 7, n. 12, p. e14712498, 2018.
- SHOMALI, A.; ALINIAEIFARD, S.; KAMRANI, Y. Y.; LOTFI, M.; AGHDAM, M. S.; RASTOGI, A.; BRESTIČ, M. Interplay among photoreceptors determines the strategy of coping with excess light in tomato. *Plant Journal*, v. 118, n. 5, p. 1423–1438, 1 jun. 2024.
- SILVA, L. de Á.; CONDORI-APFATA, J. A.; MARCELINO, M. M.; TAVARES, A. C. A.; RAIMUNDI, S. C. J.; MARTINO, P. B.; ARAÚJO, W. L.; ZSÖGÖN, A.; SULPICE, R.; NUNES-NESI, A. Nitrogen differentially modulates photosynthesis, carbon allocation and yield related traits in two contrasting *Capsicum chinense* cultivars. *Plant Science*, v. 283, p. 224–237, 1 jun. 2019.
- SINGH, A.; RAJPUT, V. D.; LALOTRA, S.; AGRAWAL, S.; GHAZARYAN, K.; SINGH, J.; MINKINA, T. Zinc oxide nanoparticles influence on plant tolerance to salinity stress: insights into physiological, biochemical, and molecular responses. *Environ Geochem Health*, V. 46,

- SUBHANI, A. M.; AMJAD, M.; IQBAL, M. M.; MURTAZA, B.; IMRAN, M.; NAEEM, M. A.; ABBAS, C.; ANDERSEN, E. N. Nickel toxicity pretreatment attenuates salt stress by activating antioxidative system and ion homeostasis in tomato (*Solanum lycopersicon* L.): an interplay from mild to severe stress. *Environmental Geochemistry and Health*, v. 45, n. 1, p. 227–246, 1 jan. 2023.
- TEIXEIRA, C. P.; DONAGEMMA, G. T.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. *Manual de Métodos de Análise de Solo*. 3. ed. [s.l: s.n.]1–577 p.
- WANG, J.; DOU, J.; YUE, Z.; WANG, J.; CHEN, T.; LI, J.; DAI, H.; DOU, T.; YU, J.; LIU, Z. Effect of hydrogen sulfide on cabbage photosynthesis under black rot stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, v. 208, 1 mar. 2024.
- WELLBURN, A. R. The Spectral Determination of Chlorophylls a and b, as well as Total Carotenoids, Using Various Solvents with Spectrophotometers of Different Resolution. *Journal of Plant Physiology*, v. 144, n. 3, p. 307–313, set. 1994.

7. Conclusão Geral

Os resultados obtidos permitem inferir que o resíduo sólido proveniente de viveiros de pintado apresenta potencial agrônomo para a substituição parcial da fertilização mineral no cultivo do tomateiro cv. Sweet Heaven. A incorporação do resíduo em doses moderadas (próximas a 30–45%) favoreceu o desempenho fisiológico da planta, especialmente a taxa fotossintética na fase vegetativa, além de promover melhorias na qualidade dos frutos, evidenciadas pelo aumento no teor de sólidos solúveis. Por outro lado, a utilização de doses mais elevadas (até 60%), embora tenha mantido a produtividade em patamares estatisticamente semelhantes ao controle mineral, aparentou impor um custo fisiológico às plantas, possivelmente associado ao desequilíbrio osmótico ou nutricional e indícios de estresse oxidativo, sobretudo na fase vegetativa.

De modo geral, o uso do resíduo como substituto parcial na composição do substrato contribuiu para o aumento do vigor das plantas, refletido em melhores respostas fisiológicas e incrementos no diâmetro do caule, indicando melhoria no estado nutricional e metabólico da cultura. A faixa de dose ótima situou-se entre 30% e 45%, com destaque para a dose de 30%, que proporcionou maior teor de sólidos solúveis totais (°Brix), ganhos qualitativos relevantes nos frutos e bom desenvolvimento vegetativo. Observou-se ainda que os efeitos dos tratamentos foram dependentes do estágio fenológico, sendo as doses intermediárias mais benéficas ao reduzir o dano celular no florescimento, enquanto a dose de 60% indicou maior nível de estresse fisiológico.

Dessa forma, conclui-se que o resíduo sólido de pintado constitui um insumo promissor e sustentável para a substituição parcial da adubação química, recomendado na faixa de 30% a 45% para melhorar o vigor da planta e, principalmente a qualidade dos frutos do tomateiro cv. Sweet Heaven, sem prejuízos à produtividade quantitativa nas condições avaliadas. O manejo nutricional integrado, associando a fonte orgânica à complementação mineral, mostra-se uma estratégia viável e benéfica, conciliando a destinação sustentável do passivo ambiental da piscicultura com a manutenção dos índices produtivos e a melhoria qualitativa dos frutos. Recomenda-se, ainda, a avaliação desse manejo em longo prazo, com foco na saúde e microbiologia do solo, bem como a eficácia em diferentes cultivares e ao longo de todo o ciclo da cultura, especialmente durante as fases de florescimento e frutificação, para confirmar plenamente seu potencial agrônomo.