

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
CÂMPUS DE CHAPADÃO DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

VITÓRIA CAROLINA DANTAS ALVES

**VITAMINAS COMO REDUTORAS DA INJÚRIA DE HERBICIDAS PÓS-
EMERGENTES NA CULTURA DA SOJA**

CHAPADÃO DO SUL – MS

2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
CÂMPUS DE CHAPADÃO DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

VITÓRIA CAROLINA DANTAS ALVES

**VITAMINAS COMO REDUTORAS DA INJÚRIA DE HERBICIDAS PÓS-
EMERGENTES NA CULTURA DA SOJA**

Orientador: Prof. Dr. Sebastião Ferreira de Lima

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Mato Grosso
do Sul, como requisito para obtenção
do título de Mestra em Agronomia,
área de concentração: Produção
Vegetal.

CHAPADÃO DO SUL – MS

2024



Serviço Público Federal
Ministério da Educação
Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

DISCENTE: Vitória Carolina Dantas Alves

ORIENTADOR: Dr. Sebastião Ferreira de Lima

TÍTULO: Vitaminas como redutoras da injúria de herbicidas pós-emergentes na cultura da soja.

AVALIADORES:

Prof. Dr. Sebastião Ferreira de Lima

Prof. Dr. Arthur Arrobas Martins Barroso

Prof. Dr. Eduardo Pradi Vendruscolo

Chapadão do Sul, 13 de dezembro de 2024.

NOTA
MÁXIMA
NO MEC

UFMS
É 10!!!



Documento assinado eletronicamente por **Sebastiao Ferreira de Lima, Professor do Magisterio Superior**, em 13/12/2024, às 19:46, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

NOTA
MÁXIMA
NO MEC

UFMS
É 10!!!



Documento assinado eletronicamente por **Eduardo Pradi Vendruscolo, Usuário Externo**, em 13/12/2024, às 19:58, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

NOTA
MÁXIMA
NO MEC

UFMS
É 10!!!



Documento assinado eletronicamente por **Arthur Arrobas Martins Barroso, Usuário Externo**, em 16/12/2024, às 13:52, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

DEDICATÓRIA

Á Deus, a minha família, em especial ao meu pai Joaquim Humberto Alves e a minha mãe Elisabete Maria de Souza Dantas Alves que sempre me apoiaram e me incentivaram a buscar os melhores caminhos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus pela benção da vida, por sempre estar comigo me dando forças, sabedoria e abençoando meus caminhos em todos os momentos da minha vida. Sou extremamente grata a Deus por tudo, e por mais essa Vitória que está prestes a se concretizar.

Minha família pelo apoio, amor e compreensão, em todos os momentos da minha vida. A minha mãe Elisabete, por ter me criado com todo amor, por sempre me apoiar e me ajudar nos diferentes momentos da vida. Ao meu pai Joaquim, por investir nos meus estudos, incentivar e me apoiar em todas as etapas da minha vida. Minha gratidão pela vida de vocês será eterna.

Em especial, agradeço a minha irmã Fernanda, que constantemente me motiva a estudar e me apoia em tudo. Ela sempre me apoiou e nunca mediu esforços para me ajudar. Obrigada por sempre estar comigo. Agradeço a minha afilhada Valentina, que é a alegria da minha vida e incentivo para seguir em frente.

Ao meu melhor amigo e companheiro Igor, que me apoia, incentiva e me ajuda em todos os momentos, incessantemente tentando fazer de mim uma pessoa melhor e me auxiliando para que eu possa alcançar todos meus objetivos.

Imensamente ao meu orientador Sebastião Ferreira de Lima, por sempre me ajudar, apoiar, me ensinar os diferentes caminhos da vida e acreditar em mim. Agradeço pela amizade, por contribuir tanto com minha carreira acadêmica e profissional, por todos conselhos e conhecimentos adquiridos. Sou grata a Deus pelas vidas do senhor e da professora Ana.

Ao nosso grupo de pesquisa GEPAF, em especial, ao Arthur, Jeysi, Victor e Evelyn que foram essenciais para a minha vida no mestrado e para a execução dos experimentos, muito obrigada.

Professor Eduardo Pradi Vendruscolo, que me apoia e incentiva desde minha graduação, obrigada pela amizade. Um professor e amigo de muita inspiração e excelência. Sou grata a Deus pela vida do senhor. Obrigada por sempre estar comigo, tirando minhas dúvidas e me mostrando que sou capaz.

Professor Alfredo Junior Paiola Albrecht, pela amizade, por me apoiar e me motivar na área acadêmica. Agradeço por ter aberto as oportunidades para minha vida e os pelos conhecidos adquiridos. Eu acredito que Deus coloca as pessoas nas nossas vidas, e não tenho dúvidas que o senhor é uma dessas pessoas para a minha vida. Agradeço ao grupo Supra

pesquisa, pelos trabalhos conduzidos, amizade, e conhecimentos adquiridos. Sempre foram uma motivação e inspiração para minha vida pessoal e acadêmica.

Professor Arthur Arrobas Martins Barroso por me ajudar, auxiliar e contribuir nessa etapa tão importante.

Professores (as) da UFMS, os colaboradores, que me auxiliaram durante esse período. Agradeço pela estrutura da UFMS.

Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão de bolsa.

Enfim, a todos aqueles que contribuíram, de alguma forma, para a realização deste trabalho.

Lista de tabela

Tabela 1. Descrição dos tratamentos do experimento de plantas de soja tratadas com soluções vitamínicas e herbicidas.....	12
Tabela 2. Dados da aplicação do experimento de plantas de soja tratadas com soluções vitamínicas e herbicidas.....	13
Tabela 3. Injúria de herbicidas na cultura da soja nos dias 7 a 21 dias após aplicação (DAA) das soluções vitamínicas e herbicidas.....	18

Lista de Figura

Figura 1. Localização da área experimental em Chapadão do Sul - MS, figura ilustrativa do mapa do Brasil e ampliado no município da condução do experimento.....	10
Figura 2. Índice pluviométrico, temperatura máxima e mínima na área experimental do Campus da Universidade Federal do Mato Grosso do Sul - MS, durante o período de novembro de 2023 a fevereiro de 2024.....	11
Figura 3. Plantas de soja após 7 DAA das soluções vitamínicas e herbicidas.....	17
Figura 4. Altura de planta (A), diâmetro do caule (B) e índice relativo de clorofila (C), de plantas de soja tratadas com soluções vitamínicas e herbicidas.....	19
Figura 5. Massa seca do caule (MSC) e da folha (MSF) da primeira avaliação (A) e massa seca do caule (MSC) e da folha (MSF) da segunda avaliação, de plantas de soja tratadas com soluções vitamínicas e herbicidas.....	20
Figura 6. Fotossíntese líquida (A), condutância estomática (B), concentração interna de CO ₂ (C) e transpiração (D), de plantas de soja tratadas com soluções vitamínicas e herbicidas.....	21
Figura 7. Eficiência do uso da água (A), eficiência instantânea de carboxilação (B), de plantas de soja tratadas com soluções vitamínicas e herbicidas.....	22
Figura 8. Clorofila a (A), clorofila b (B), clorofila total (C) e carotenoides (D), de plantas de soja tratadas com soluções vitamínicas e herbicidas.....	23
Figura 9. Feofitina a (A), feofitina b (B) e feofitina total (C), de plantas de soja tratadas com soluções vitamínicas e herbicidas.....	24
Figura 10. Altura de inserção de primeira vagem (A) e número de nós por planta (B), número de ramificações (C), número de vagens por planta (D) e número de grãos por vagem (E) de plantas de soja tratadas com soluções vitamínicas e herbicidas.....	29
Figura 11. Massa de 1.000 grãos (A) e produtividade (B), de plantas de soja tratadas com soluções vitamínicas e herbicidas.....	30

Sumário

CAPÍTULO 1 - VITAMINAS COMO REDUTORAS DA INJÚRIA DE HERBICIDAS PÓS-EMERGENTES NA CULTURA DA SOJA	11
RESUMO	11
ABSTRACT.	12
1. INTRODUÇÃO	13
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	14
2.1. Localização e clima.....	14
2.2. Preparo do solo e material vegetal	15
2.3. Delineamento experimental e aplicação	16
2.4 Adubação de cobertura e manejo fitossanitário	17
2.5. Avaliações	17
2.6. Injúria e Caracteres agronômicos.....	17
2.7. Avaliações de Trocas gasosas.....	17
2.8. Pigmentos e Massa seca	18
2.9. Análises fitotécnicas.....	18
3.0. Análise Estatística	18
4. RESULTADOS	18
5. DISCUSSÃO	28
5.1 Características fitotécnicas	28
5.2. Trocas gasosas	29
5.3. Pigmentos	30
5.6 Componentes de Produção	32
6. CONCLUSÃO	33
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	33
CAPÍTULO 2 - VITAMINAS PROMOTORAS DO SISTEMA SECUNDÁRIO E AMINOÁCIDOS EM PLANTAS DE SOJA COM INJÚRIA DE HERBICIDAS PÓS-EMERGENTES.....	42
RESUMO	42
1. INTRODUÇÃO	44
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	45
2.1. Localização e clima.....	45
2.2. Preparo do solo e material vegetal	46
2.3. Delineamento experimental e aplicação	47

2.4 Adubação de cobertura e manejo fitossanitário	48
2.5 Avaliações	48
2.6. Análise de cromatografia líquida para quantificação de aminoácidos	48
2.7. Análise de cromatografia líquida para quantificação de flavonoides	49
2.8. Análise Estatística	50
3.0 RESULTADOS.....	50
4. DISCUSSÃO	54
4.1 Flavonoides	54
4.2 Aminoácidos	56
5. CONCLUSÃO	59
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60

CAPÍTULO 1 - VITAMINAS COMO REDUTORAS DA INJÚRIA DE HERBICIDAS PÓS-EMERGENTES NA CULTURA DA SOJA

RESUMO: A expansão do cultivo da soja visa a busca por alternativas de manejo e gera a necessidade de atenuação dos efeitos fitotóxicos do uso de herbicidas para controle de plantas daninhas. Assim, o objetivo do estudo foi avaliar os efeitos da aplicação exógena de tiamina e nicotinamida em características fisiológicas e fitotécnicas de plantas de soja submetidas à aplicação de herbicidas pós-emergentes. Foi utilizado o delineamento experimental de blocos casualizados, com oito tratamentos e quatro repetições. Os tratamentos consistiram em doses de 7,5 e 15 g ha⁻¹ de tiamina, e doses de 22,5 e 45 g ha⁻¹ de nicotinamida, associadas com os herbicidas Fomesafem (227,70 g i.a. ha⁻¹) + S-Metolaclo (1.040,00 g i.a. ha⁻¹) + Clomazona (540,00 g i.a. ha⁻¹) e um tratamento somente com os herbicidas. Foram avaliadas as características fisiológicas e fitotécnicas. Para a eficiência do uso da água, a combinação de tiamina e nicotinamida nas doses de 7,5 g + 22,5 g ha⁻¹ respectivamente, e 45 g ha⁻¹ de nicotinamida resultaram em média superior, 10,70% dos demais tratamentos. Para a clorofila total e carotenoides, a aplicação de tiamina na dose de 7,5 g ha⁻¹ foi superior em 26,80% e 53,0% aos demais tratamentos, respectivamente. Para os componentes de produção, os tratamentos da dose de 22,5 g ha⁻¹ de nicotinamida (50N+H), a junção da tiamina e nicotinamida na dose de 45 g ha⁻¹ (100N100T+H) proporcionaram ganhos em relação ao tratamento de herbicidas. A aplicação exógena das vitaminas, tiamina e nicotinamida foi capaz de amenizar o efeito fitotóxico da aplicação de herbicidas pós-emergentes na cultura da soja, com destaque quando se utiliza a nicotinamida, na dose de 22,5 g ha⁻¹, a qual incrementou na maioria dos pigmentos e componentes de produção.

Palavras-Chave: *Glycine max*; Vitaminas do complexo B; Sustentabilidade; Clomazone; Eddus.

ABSTRACT: The expansion of soybean cultivation aims to search for alternative management and generates the need to mitigate the phytotoxic effects of the use of herbicides for weed control. Thus, the objective of the study was to evaluate the effects of the exogenous application of thiamine and nicotinamide on the physiological and phytotechnical characteristics of soybean plants subjected to the application of post-emergence herbicides. A randomized block experimental design was used, with eight treatments and four replicates. The treatments consisted of doses of 7.5 and 15 g ha⁻¹ of thiamine, and doses of 22.5 and 45 g ha⁻¹ of nicotinamide, associated with the herbicides Fomesafem (227.70 g a.i. ha⁻¹) + S-Metolachlor (1.040,00 g a.i. ha⁻¹) + Clomazone (540.00 g a.i. ha⁻¹) and one treatment with only the herbicides. The physiological and phytotechnical characteristics were evaluated. For water use efficiency, the combination of thiamine and nicotinamide at doses of 7.5 g + 22.5 g ha⁻¹ respectively, and 45 g ha⁻¹ of nicotinamide resulted in a higher average, 10.70%, than the other treatments. For total chlorophyll and carotenoids, the application of thiamine at a dose of 7.5 g ha⁻¹ was 26.80% and 53.0% higher than the other treatments, respectively. For production components, the treatments with a dose of 22.5 g ha⁻¹ of nicotinamide (50N+H), the combination of thiamine and nicotinamide at a dose of 45 g ha⁻¹ (100N100T+H) provided gains in relation to the herbicide treatment. The exogenous application of vitamins, thiamine and nicotinamide was able to mitigate the phytotoxic effect of the application of post-emergence herbicides in soybean crops, especially when nicotinamide was used at a dose of 22.5 g ha⁻¹, which increased most pigments and production components.

Keywords: *Glycine max*; B vitamins; sustainability; Clomazone; Eddus.

1. INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max* (L.) Merrill) é uma oleaginosa de grande importância global, amplamente cultivada em vários países (Mishra et al., 2024). Em termos de composição, a soja se destaca por apresentar o maior teor de proteína entre todas as culturas alimentares, variando em torno de 40–42% (Siamabele, 2021). Além disso, no que se refere ao teor de óleo, entre as leguminosas comestíveis, ele fica atrás apenas do amendoim, com uma proporção variando entre 18 e 22% (Xu et al., 2022) e no Brasil, é plantada em uma área de mais de 46 milhões de hectares, sendo o principal produto de exportação (CONAB, 2024).

O desenvolvimento da cultura da soja é influenciado por vários fatores bióticos e abióticos (Brochado et al., 2023), entre os fatores bióticos, as plantas daninhas são um fator significativo quando se visa a melhoria do rendimento das culturas (Horvath, 2023), causando cerca de 34% de perda de rendimento nas principais culturas em todo o mundo (Kumar et al., 2022). Para minimizar os efeitos negativos das plantas daninhas, são amplamente utilizados os herbicidas (Ahmad et al., 2024), porém, seu uso pode acumular mais espécies reativas de oxigênio nas plantas, influenciando os processos fisiológicos, metabólicos e a viabilidade celular, constituindo uns dos principais componentes responsáveis pela injúria (Trxler et al., 2023).

A injúria refere-se à capacidade de substâncias químicas induzirem efeitos negativos nas plantas (Barbás et al., 2023). O uso indevido ou a aplicação excessiva dessas substâncias pode causar danos às plantas, redução da produtividade e perda do valor da produção (Edwards et al., 2023). Dentre os compostos que podem atenuar essa injúria tem-se os bioestimulantes, como, as vitaminas do complexo B, também conhecidas como nicotinamida (B3) e a tiamina (B1) (Aghamohammadi et al., 2022). Estas vitaminas podem melhorar o rendimento e a qualidade das culturas (Kausar et al., 2023; Lima et al., 2024).

A nicotinamida (vitamina B3) interfere diretamente no sistema de defesa das plantas, através da sinalização de estresse, induzindo ou regulando o acúmulo de metabólitos secundários (Lima et al., 2024), proporcionando melhor desempenho quanto à manutenção das atividades fisiológicas e crescimento durante períodos de estresse (Vendruscolo et al., 2024), e é considerada essencial (Kirkland et al., 2018) por participar da metabolização de carboidratos, gorduras e proteínas envolvidas na fotossíntese e na respiração celular (Mohamed et al., 2020).

A tiamina (vitamina B1) é um estimulante de crescimento que atua como cofator em muitos mecanismos dinâmicos das plantas, como na biossíntese de enzimas no ciclo de

Calvin e Krebs (Kausar et al., 2023). Também atua como antioxidante para aliviar espécies reativas de oxigênio (ERO), atua reduzindo os efeitos do estresse na planta, aumenta ou mantém a síntese de clorofilas, auxilia na produção de compostos antioxidantes e no metabolismo secundário (Jabeen et al., 2021), melhorando, consequentemente, a capacidade da planta de suportar condições estressantes. Diante disso, o objetivo do estudo foi avaliar os efeitos da aplicação exógena de tiamina e nicotinamida em características fisiológicas e fitotécnicas para as plantas de soja submetidas a aplicação de herbicidas pós-emergentes.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Localização e clima

O experimento foi conduzido na área experimental da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, em Chapadão do Sul – MS (Figura 1), com latitude 18°46' 44" Sul, longitude 52° 36' 59" Oeste e altitude de 820 metros, na safra 23/24. O clima da região é categorizado como tropical úmido (Aw), de acordo com a classificação de Köppen, com estação chuvosa no verão e seca no inverno (Dubreuil et al., 2018). A precipitação pluvial média é de 1.850 mm, com temperatura média anual de 13°C a 29°C (Cunha et al., 2013).



Figura 1. Localização da área experimental em Chapadão do Sul - MS, figura ilustrativa do mapa do Brasil e ampliado no município da condução do experimento. Fonte: Mapchat.

Foram obtidos os dados de temperatura e precipitação durante o período de condução do experimento (Figura 2). O solo da região é classificado como Latossolo Vermelho

Distrófico argiloso (Santos et al., 2018), tendo características na camada de 0 - 0,20 m: pH (CaCl₂) = 5,4; Al trocável (cmol_c dm⁻³) = 0,05; Ca+Mg (cmol_c dm⁻³) = 6,30; P (mg dm⁻³) = 18,3; K (mg dm⁻³) = 52,0; Matéria orgânica (g dm⁻³) = 27,4; V (%) = 68,2; m (%) = 0,0; Soma de bases (cmol_c dm⁻³) = 4,1; CTC (cmol_c dm⁻³) = 9,4.

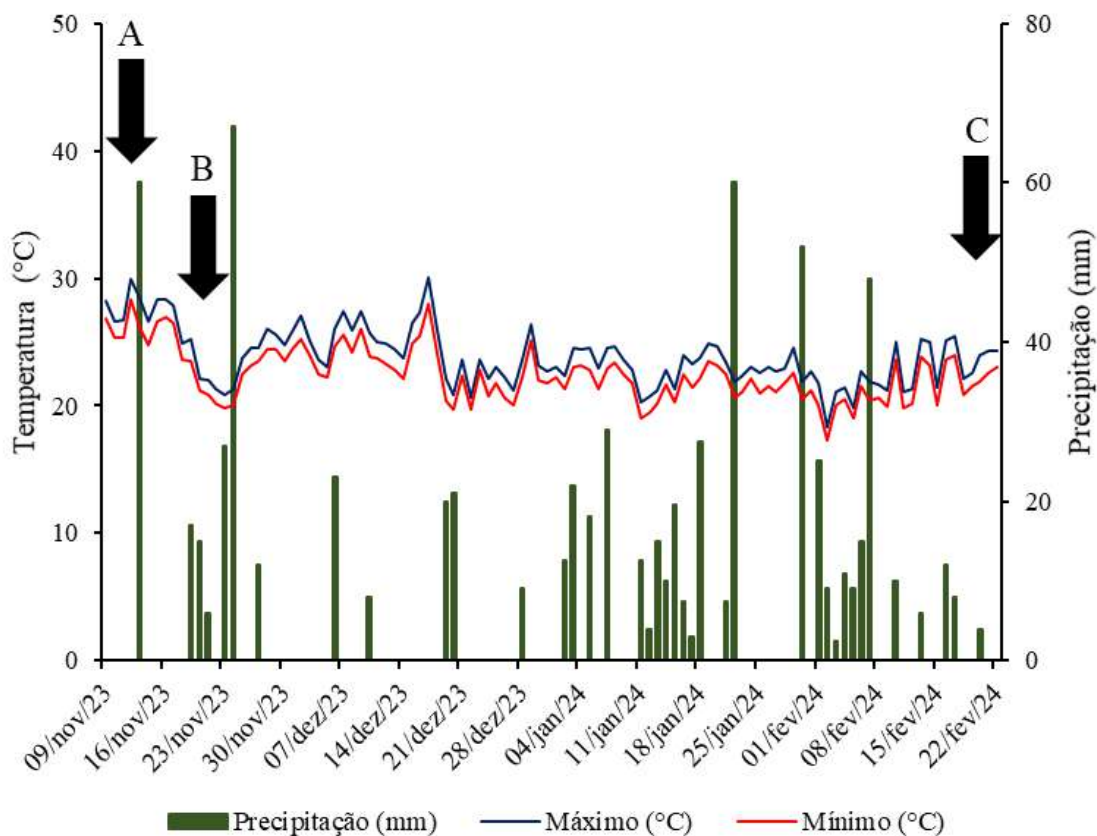


Figura 2. Semeadura da cultura (A), aplicação da soluções vitamínicas e herbicidas vitamínica com os herbicidas (B), colheita do experimento (C), índice pluviométrico, temperatura máxima e mínima na área experimental do Campus da Universidade Federal do Mato Grosso do Sul - MS, durante o período de novembro de 2023 a fevereiro de 2024. Fonte: Inmet.

2.2. Preparo do solo e material vegetal

Não houve necessidade de correção do solo. Antes da semeadura da cultura da soja, foi feita a dessecação da área total. As plantas daninhas foram dessecadas com glifosato na dose de 1,11 kg equivalente ácido (i.a.) ha⁻¹. A semeadura foi realizada no mês de novembro, com uma semeadora mecanizada de quatro linhas. No momento da semeadura foram aplicados 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅, e utilizada cultivar “Olimpo”, semeada com 11 sementes por

metro. As sementes foram tratadas com o Tiametoxam 350 g L⁻¹, Metalaxil-M 10 g L⁻¹ e Fludioxonil 25 g L⁻¹ e inoculada com um inoculante líquido para soja, *Bradyrhizobium japonicum* (SEMIA 5080) e *Bradyrhizobium elkanii* (SEMIA 587).

As parcelas experimentais foram constituídas por cinco linhas de 5 m de comprimento, espaçadas de 0,50 m entre si. As três linhas centrais foram utilizadas para as avaliações.

2.3. Delineamento experimental e aplicação

O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados com oito tratamentos e quatro repetições, totalizando 32 parcelas. Foram utilizadas doses de 7,5 e 15 g ha⁻¹ de tiamina, sendo 50% e 100%, respectivamente (Vendruscolo e Seleguini, 2020) e doses de 22,5 e 45 g ha⁻¹ de nicotinamida, também compreendendo 50% e 100%, respectivamente (Vendruscolo et al., 2017). Junto as vitaminas foram associadas os herbicidas (Eddus[®] fomesafem 227,70 g i.a. ha⁻¹ + S-Metolacoloro 1.040,00 g i.a. ha⁻¹) + (Reator[®] 360 CS clomazona 540,00 g i.a. ha⁻¹), sendo implementado um tratamento adicional, somente com os herbicidas.

Tabela 1. Descrição dos tratamentos do experimento de plantas de soja tratadas com soluções vitamínicas e herbicidas.

Tratamentos	Doses
Controle	Testemunha
50N+H	22,5 g nicotinamida ha ⁻¹ + herbicidas
50T+H	7,5 g tiamina ha ⁻¹ + herbicidas
50N50T+H	22,5 g nicotinamida ha ⁻¹ + 7,5 g tiamina ha ⁻¹ + herbicidas
100N+H	45 g nicotinamida ha ⁻¹ + herbicidas
100T+H	15 g tiamina ha ⁻¹
100N100T+H	45 g nicotinamida ha ⁻¹ + 15 g tiamina ha ⁻¹ + herbicidas
H	Herbicidas

Os produtos isolados e suas combinações foram aplicados no estágio V1 da cultura, utilizando um pulverizador costal pressurizado a CO₂, com seis pontas (TT 110.015), sob

pressão constante de 1,8 bar, monitorada por manômetro na barra de pulverização, e velocidade de 1,0 ms⁻¹, a taxa de aplicação foi equivalente a 170 L ha⁻¹.

2.4 Adubação de cobertura e manejo fitossanitário

No estágio V3, foram aplicados 100 kg ha⁻¹ de K₂O em cobertura. Foram realizadas aplicações de inseticidas nos estádios de V5, R1, R4 e R5, com produtos e doses de 750 mL ha⁻¹ de Etiprole, 100 mL ha⁻¹ *Beauveria Bassiana* isolado Simbi BB 15, 100 mL ha⁻¹ de Clorantniliprole, 80 mL ha⁻¹ de Lambda-cialotrina, 300 g ha⁻¹ de Acetamiprido e Bifentrina, visando o controle de *Diabrotica speciosa* (vaquinha), *Bemisia tabaci* (mosca-branca), *Spodoptera eridania* (lagarta das folhas) e *Euchistus heros* (percevejo marrom). Os fungicidas foram aplicados nos estádios V5, R1, R4 e R5, utilizando os produtos Mancozebe 1,5 kg ha⁻¹; 300 mL ha⁻¹ de Picoxistrobina e Ciproconazol; 250 g ha⁻¹ de Azoxistrobina e Benzovindiflupir, para o controle principal da (*Phakopsora pachyrhizi*) ferrugem asiática.

2.5. Avaliações

2.6. Injúria e Caracteres agronômicos

A avaliação de injúria da soja foi realizada aos 7, 14 e 21 dias após a aplicação (DAA) das soluções vitamínicas e herbicidas, a partir da avaliação de 21 dias, foi observado a ausência de injúria, sendo determinada por comparação visual, em que foram atribuídas notas de zero (0) (ausência de injúria) a cem (100%) (morte das plantas), de acordo com Alam (1974). Também foi mensurado aos 7 dias após a aplicação, a altura de planta, com auxílio de uma régua graduada em cm. O diâmetro do caule foi medido com um paquímetro digital, massa seca do caule e folha (primeira avaliação) e índice relativo de clorofila foi determinado com um clorofilômetro digital CFL 1030, (Falker, Porto Alegre, RS). As leituras foram feitas no terceiro trifólio completamente aberto, a partir do topo das plantas de soja. E foram coletadas cinco plantas aleatoriamente por parcelas, para avaliar a massa seca do caule e das folhas. Após a coleta, as amostras foram pesadas e em seguida submetidas à secagem em estufa com circulação forçada de ar à temperatura de 65 °C, até a obtenção de massa constante, com posterior pesagem das amostras com em balança analítica.

2.7. Avaliações de Trocas gasosas

Após 30 dias da semeadura e 15 dias após as aplicações foram avaliadas as características de fotossíntese líquida (A), condutância estomática (gS), concentração de

CO₂ intracelular (C_i) e transpiração (E) durante a parte da manhã, quando as plantas estão em plena atividade de troca gasosa, entre 08 e 10 am, utilizando-se um medidor de fotossíntese portátil (LCF, LI-COR, Estados Unidos). Também, foram calculadas a eficiência instantânea de carboxilação (EICI) através da relação A/C_i e a eficiência do uso da água (WUE) pela relação A/E.

2.8. Pigmentos e Massa seca

No estágio R1, foi coletado uma folha totalmente desenvolvida do terço médio das plantas para determinação de pigmentos. As amostras foram então despigmentadas, por três dias utilizando 80% de acetona. A análise espectrofotométrica foi conduzida usando um espectrofotômetro em comprimentos de onda específicos: 663 nm para clorofila a, 647 nm para clorofila b, 470 nm para carotenoides, 665 nm para feofitina a e 653 nm para feofitina b (Lichtenthaler, 1987). Nesse estágio também foram determinadas a segunda avaliação da massa seca das folhas e caule.

2.9. Análises fitotécnicas

A colheita foi realizada aos 112 dias após a semeadura. No momento da colheita, cinco plantas por parcela foram coletadas, para proceder às avaliações fitotécnicas. Avaliou-se a altura de plantas, a altura de inserção da primeira vagem, o número de nós na haste principal, número de ramos nas hastes, número de vagens por planta e número de grãos por vagem. Foram coletadas cinco plantas aleatoriamente por parcelas, para avaliar a massa seca do caule e das folhas. Após a coleta, as amostras foram pesadas e em seguida submetidas à secagem em estufa com circulação forçada de ar à temperatura de 65 °C, até obter massa constante e pesadas as amostras com a balança analítica. Posteriormente, a parcela toda foi colhida e trilhada para então determinar a massa de mil grãos e a produtividade. Toda massa de grãos foi ajustada para 13% de umidade.

3.0. Análise Estatística

Os dados foram submetidos a análise de variância e as médias comparadas pelo teste Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade, no caso de efeitos significativos do teste F ($p \leq 0,05$), utilizando o software estatístico Sisvar versão 5.6 (Ferreira et al., 2019).

4. RESULTADOS

Aos 7 dias após a aplicação (DAA) as vitaminas não influenciaram nos níveis de injúria (Figura 3 e Tabela 2) decorrentes da aplicação dos herbicidas que se mantiveram em média nos 30%. Aos 14 DAA os tratamentos compostos por metade das doses de nicotinamida + tiamina (50N50T+H) e a dose completa de tiamina (100T+H) possuíram os melhores desempenhos para a atenuação da injúria causada por herbicidas em relação ao tratamento com herbicidas (Tabela 2).

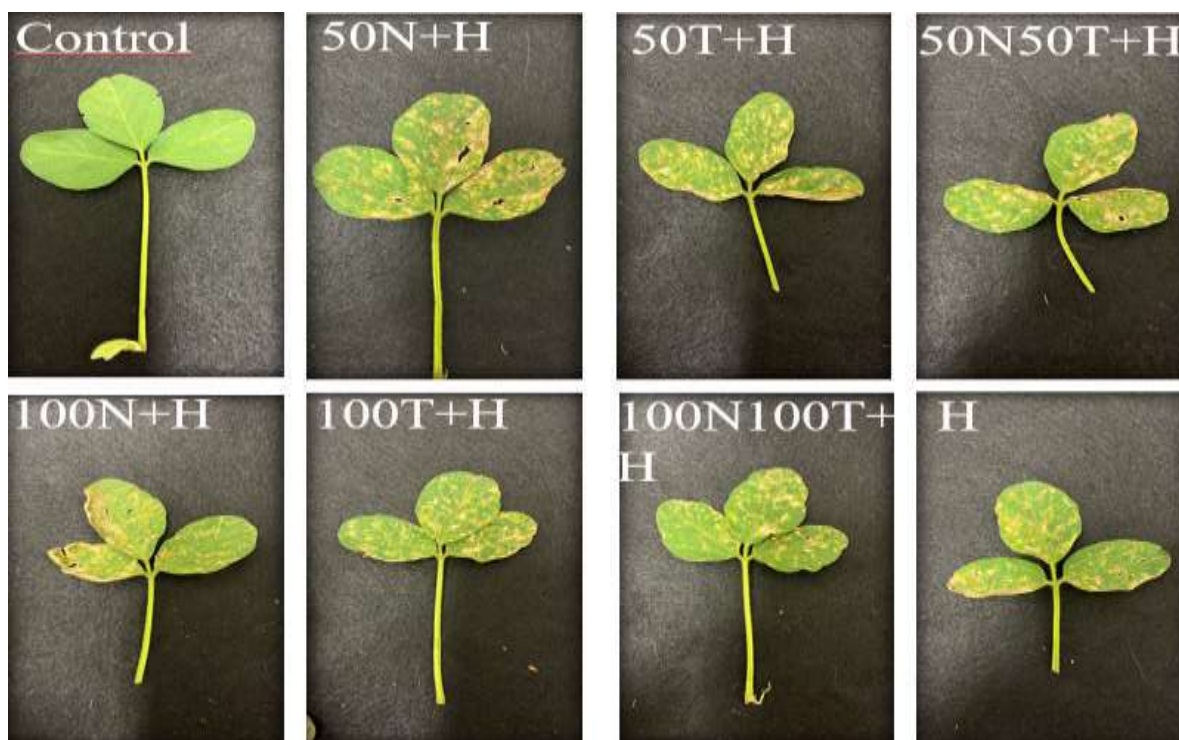


Figura 3. Plantas de soja após 7 dias da aplicação das soluções vitamínicas e herbicidas. Control: testemunha; 50N+H: 22,5 g nicotinamida ha^{-1} + herbicidas; 50T+H: 7,5 g tiamina ha^{-1} + herbicidas; 50N50T+H: 22,5 g nicotinamida ha^{-1} + 7,5 g tiamina ha^{-1} + herbicidas L^{-1} ; 100N+H: 45 g nicotinamida ha^{-1} + herbicidas; 100T+H: 15 g tiamina ha^{-1} ; 100N100T+H: 45 g nicotinamida ha^{-1} + 15 g tiamina ha^{-1} + herbicidas; H: herbicidas.

Aos 21 dias após a aplicação os tratamentos de metade da dose de tiamina (50T+H), a metade das doses de nicotinamida + tiamina (50N50T+H) e a dose completa de nicotinamida + tiamina (100N100T+H) proporcionaram menores níveis de injúria para as plantas de soja.

Tabela 2. Injúria de herbicidas na cultura da soja aos dias 7 a 21 dias após aplicação (DAA) das soluções vitamínicas e herbicidas.

Tratamentos	Fitotoxicidade (%) – Dias Após Aplicação (DAA)			Recuperação fito (21-7)
	7	14	21	
Controle	0.00b	0.00d	0.00c	0
50N+H	34.75a	27.50a	5.50a	29,25 (2,08 dia)
50T+H	34.00a	25.50b	4.75b	29,25 (2,08)
50N50T+H	33.50a	22.50c	4.25b	29,25 (2,08)
100N+H	32.75a	27.50a	5.50a	27,25 (1,94)
100T+H	32.25a	23.25c	5.00a	27,25 (1,94)
100N100T+H	33.50a	26.00b	3.50b	30 (2,14)
H	33.25a	25.50b	6.25a	27 (1,92)
CV (%)	6.25	3.35	15.41	
Média Geral	29.25	22.22	4.34	

Letras diferentes na coluna indicam diferença significativa pelo teste de Skott-Knott com 5% de probabilidade ($p \leq 0,05$). Controle: testemunha sem aplicações; 50N+H: 22,5 g nicotinamida ha^{-1} + herbicidas; 50T+H: 7,5 g tiamina ha^{-1} + herbicidas; 50N50T+H: 22,5 g nicotinamida ha^{-1} + 7,5 g tiamina ha^{-1} + herbicidas; 100N+H: 45 g nicotinamida ha^{-1} + herbicidas; 100T+H: 15 g tiamina ha^{-1} ; 100N100T+ H: 45 g nicotinamida ha^{-1} + 15 g tiamina ha^{-1} + herbicidas; H: herbicidas.

Aos 7 dias, o tratamento com metade da dose de nicotinamida (50N+H) para a altura das plantas, promoveu ganho de 8,82%, em relação ao uso apenas de herbicidas. Para o diâmetro do caule todos os tratamentos, exceto o tratamento da metade da dose de tiamina (50T+H), proporcionaram aumento no diâmetro do caule das plantas de soja.

Para o índice relativo de clorofila, os tratamentos com metade da dose de nicotinamida (50N+H), tiamina (50T+H), a dose completa de nicotinamida (100N+H) e de tiamina (100T+H) obtiveram maiores valores em relação aos tratamentos com herbicidas.

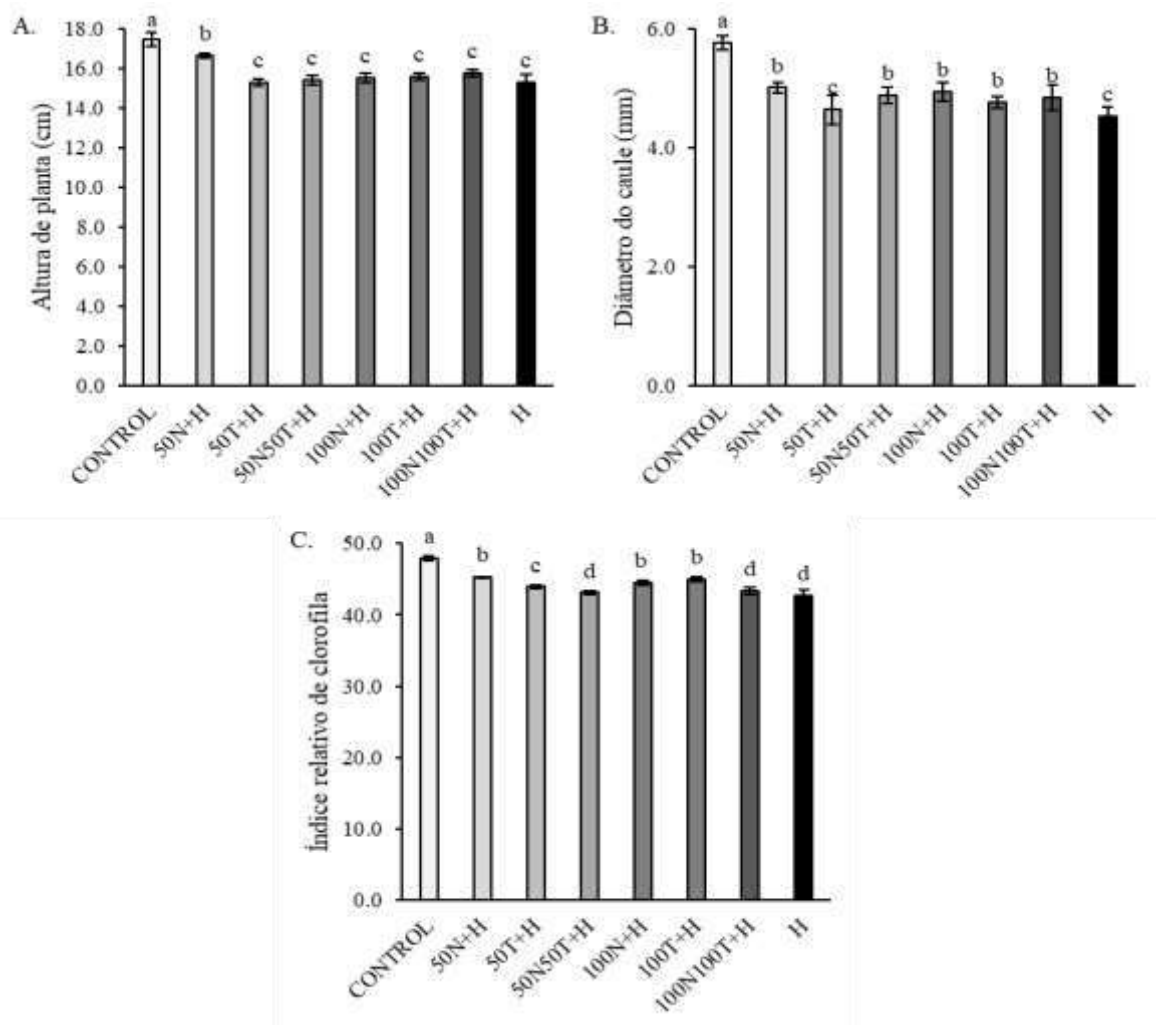


Figura 4. Altura de planta (A), diâmetro do caule (B) e índice relativo de clorofila (C), de plantas de soja tratadas com soluções vitamínicas e herbicidas. Letras diferentes sobre as barras indicam diferença significativa pelo teste de Skott-Knott com 5% de probabilidade ($p \leq 0,05$). Barras de erro representam desvio padrão ($n = 4$). Control: testemunha; 50N+H: 22,5 g nicotinamida ha^{-1} + herbicidas; 50T+H: 7,5 g tiamina ha^{-1} + herbicidas; 50N50T+H: 22,5 g nicotinamida ha^{-1} + 7,5 g tiamina ha^{-1} + herbicidas L^{-1} ; 100N+H: 45 g nicotinamida ha^{-1} + herbicidas; 100T+H: 15 g tiamina ha^{-1} ; 100N100T+H: 45 g nicotinamida ha^{-1} + 15 g tiamina ha^{-1} + herbicidas; H: herbicidas.

Para a massa seca na primeira e na segunda avaliação o tratamento com metade da dose de nicotinamida (50N+H) promoveu um ganho no rendimento 36,84% para a massa seca do caule e 80,6% para a massa seca da folha e na segunda avaliação, o ganho foi de 33,58% para a massa do caule e 44,80% para a massa seca da folha, quando comparado aos demais tratamentos.

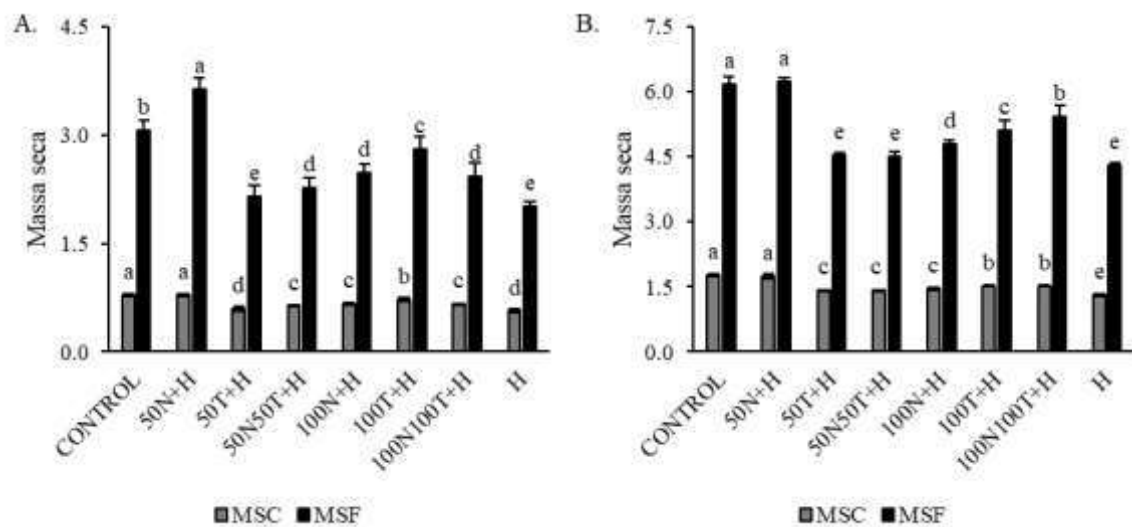


Figura 5. Massa seca do caule (MSC) e da folha (MSF) da primeira avaliação (A) e massa seca do caule (MSC) e da folha (MSF) da segunda avaliação, de plantas de soja tratadas com soluções vitamínicas e herbicidas. Letras diferentes sobre as barras indicam diferença significativa pelo teste de Skott-Knott com 5% de probabilidade ($p \leq 0,05$). Barras de erro representam desvio padrão ($n = 4$). Control: testemunha; 50N+H: 22,5 g nicotinamida ha^{-1} + herbicidas; 50T+H: 7,5 g tiamina ha^{-1} + herbicidas; 50N50T+H: 22,5 g nicotinamida ha^{-1} + 7,5 g tiamina ha^{-1} + herbicidas L^{-1} ; 100N+H: 45 g nicotinamida ha^{-1} + herbicidas; 100T+H: 15 g tiamina ha^{-1} ; 100N100T+ H: 45 g nicotinamida ha^{-1} + 15 g tiamina ha^{-1} + herbicidas; H: herbicidas.

Para a concentração de CO_2 intracelular houve influência, sendo que o tratamento na dose de 50% de tiamina (50T+H) apresentou a melhor média, obtendo 4,10% de rendimento superior em relação ao tratamento somente com herbicidas (Figura 6). A aplicação das vitaminas não interferiu na fotossíntese, condutância estomática e transpiração.

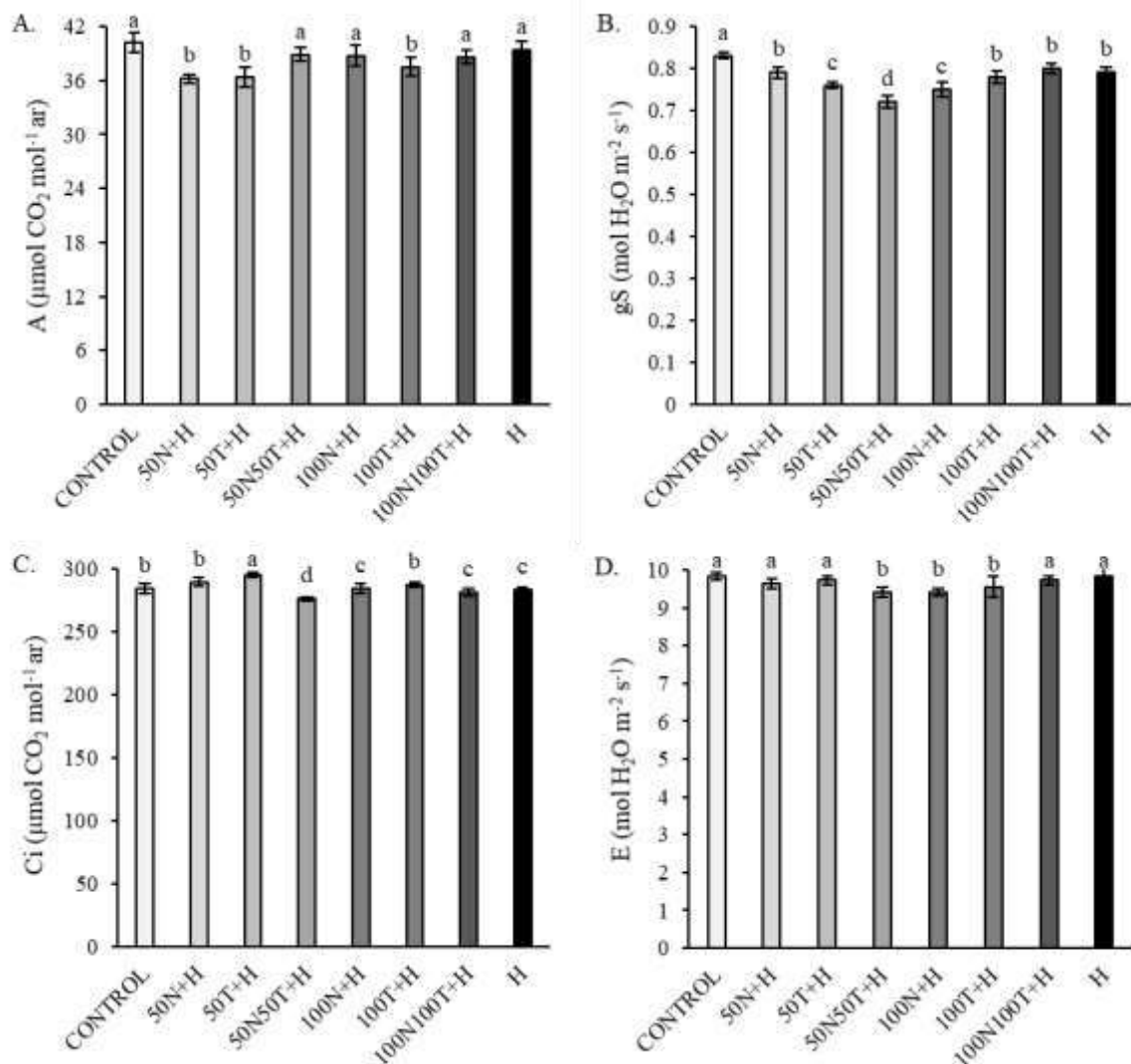


Figura 6. Fotossíntese líquida (A), condutância estomática (B), concentração interna de CO_2 (C) e transpiração (D), de plantas de soja tratadas com soluções vitamínicas e herbicidas. Letras diferentes sobre as barras indicam diferença significativa pelo teste de Skott-Knott com 5% de probabilidade ($p \leq 0,05$). Barras de erro representam desvio padrão ($n = 4$). Control: testemunha; 50N+H: 22,5 g nicotinamida ha^{-1} + herbicidas; 50T+H: 7,5 g tiamina ha^{-1} + herbicidas; 50N50T+H: 22,5 g nicotinamida ha^{-1} + 7,5 g tiamina ha^{-1} + herbicidas L^{-1} ; 100N+H: 45 g nicotinamida ha^{-1} + herbicidas; 100T+H: 15 g tiamina ha^{-1} ; 100N100T+H: 45 g nicotinamida ha^{-1} + 15 g tiamina ha^{-1} + herbicidas; H: herbicidas.

Para a eficiência do uso da água, a junção da tiamina e nicotinamida na dose de 50% (50N50T+H) e a nicotinamida na dose de 100% (50N+H), proporcionou um ganho médio 10,72% acima dos demais tratamentos (Figura 7). E para a eficiência instantânea de carboxilação a junção da tiamina e nicotinamida na dose de 50% (50N50T+H), obteve

um desempenho de 16,67% acima dos demais tratamentos.

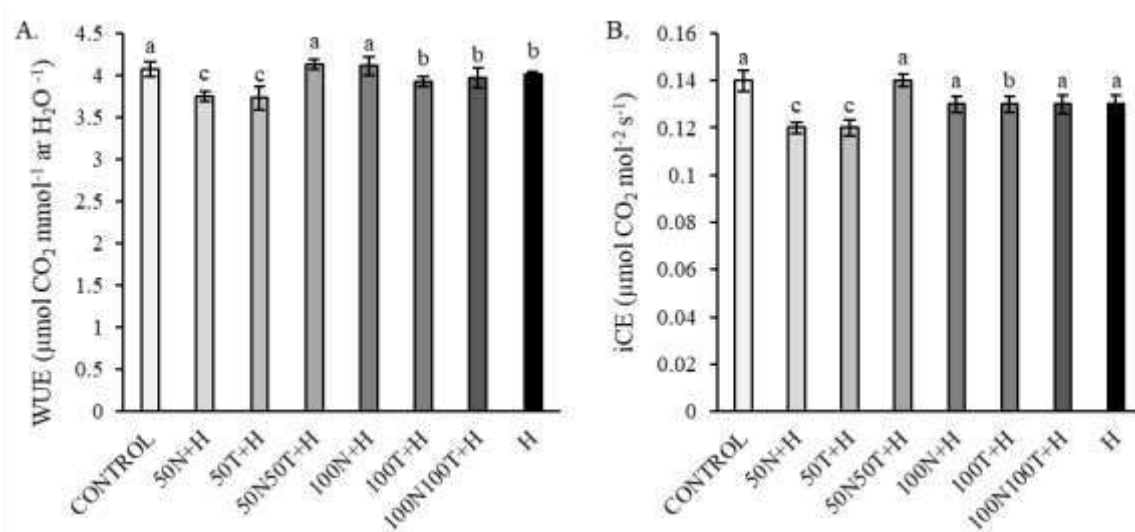


Figura 7. Eficiência do uso da água (A), eficiência instantânea de carboxilação (B), de plantas de soja tratadas com soluções vitamínicas e herbicidas. Letras diferentes sobre as barras indicam diferença significativa pelo teste de Skott-Knott com 5% de probabilidade ($p \leq 0,05$). Barras de erro representam desvio padrão ($n = 4$). Control: testemunha; 50N+H: 22,5 g nicotinamida ha^{-1} + herbicidas; 50T+H: 7,5 g tiamina ha^{-1} + herbicidas; 50N50T+H: 22,5 g nicotinamida ha^{-1} + 7,5 g tiamina ha^{-1} + herbicidas L^{-1} ; 100N+H: 45 g nicotinamida ha^{-1} + herbicidas; 100T+H: 15 g tiamina ha^{-1} ; 100N100T+ H: 45 g nicotinamida ha^{-1} + 15 g tiamina ha^{-1} + herbicidas; H: herbicidas.

Para a clorofila a, os tratamentos na dose de 50% de nicotinamida (N50+H) e tiamina (T50+H) aumentaram positivamente 30,31% e 25,80% em relação ao tratamento somente com herbicidas. Para a clorofila b, total e carotenóides a dose de 50% de tiamina (50T+H) superou em 66,49%, 27,0% e 53,0%, os demais tratamentos, respectivamente (Figura 8).

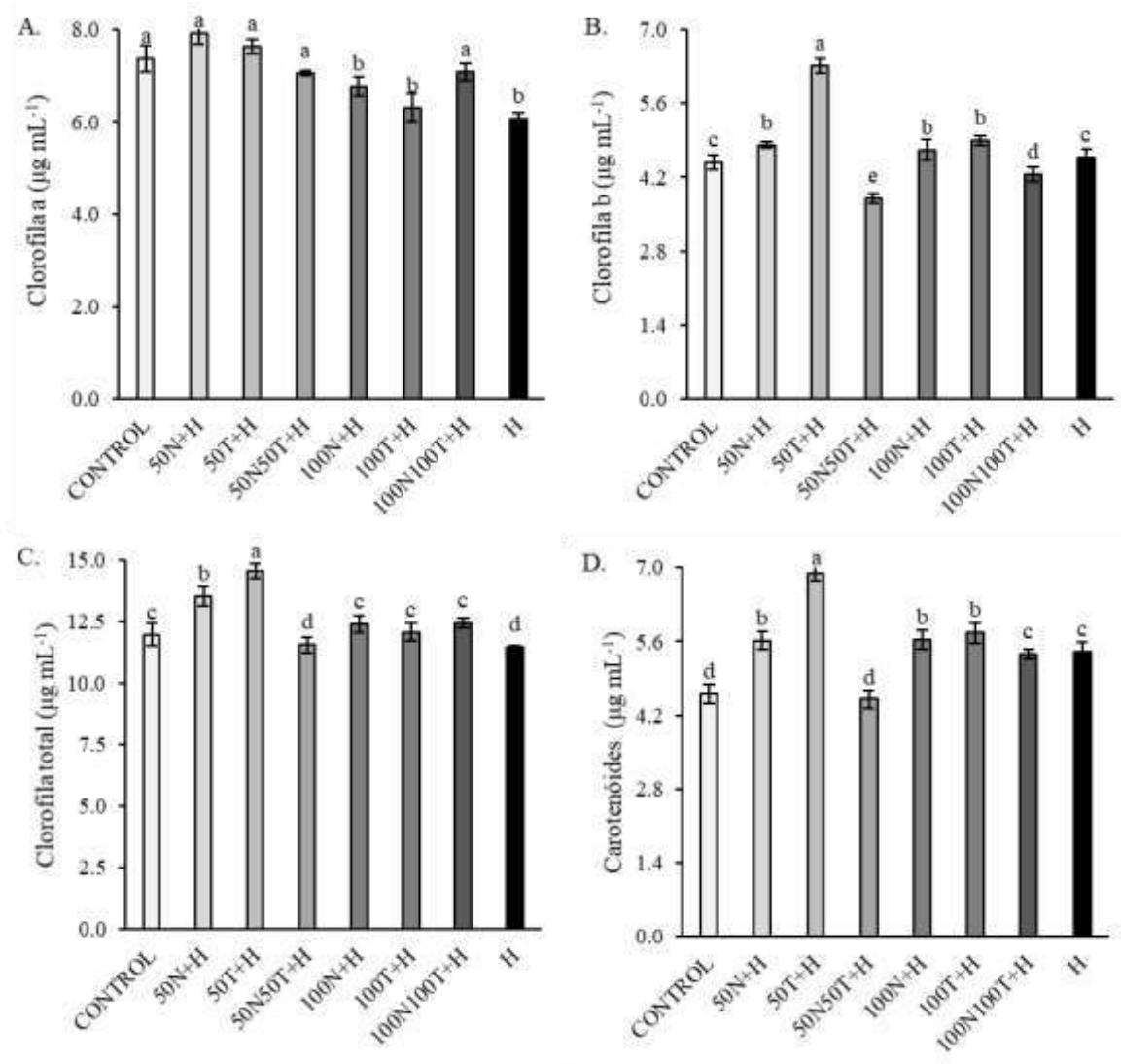


Figura 8. Clorofila a (A), clorofila b (B), clorofila total (C) e carotenoides (D), de plantas de soja tratadas com soluções vitamínicas e herbicidas. Letras diferentes sobre as barras indicam diferença significativa pelo teste de Skott-Knott com 5% de probabilidade ($p \leq 0,05$). Barras de erro representam desvio padrão ($n = 4$). Control: testemunha; 50N+H: 22,5 g nicotinamida ha^{-1} + herbicidas; 50T+H: 7,5 g tiamina ha^{-1} + herbicidas; 50N50T+H: 22,5 g nicotinamida ha^{-1} + 7,5 g tiamina ha^{-1} + herbicidas L^{-1} ; 100N+H: 45 g nicotinamida ha^{-1} + herbicidas; 100T+H: 15 g tiamina ha^{-1} ; 100N100T+H: 45 g nicotinamida ha^{-1} + 15 g tiamina ha^{-1} + herbicidas; H: herbicidas.

Em relação a feofitina a e feofitina total, a dose de 50% de nicotinamida (N50+H), se sobressaiu dos demais tratamentos, com um ganho de 55,60% e 40,40%, respectivamente. Para a feofitina b, o tratamento somente com herbicidas obteve-se um aumento de 57,10% dentre os demais tratamentos (Figura 9).

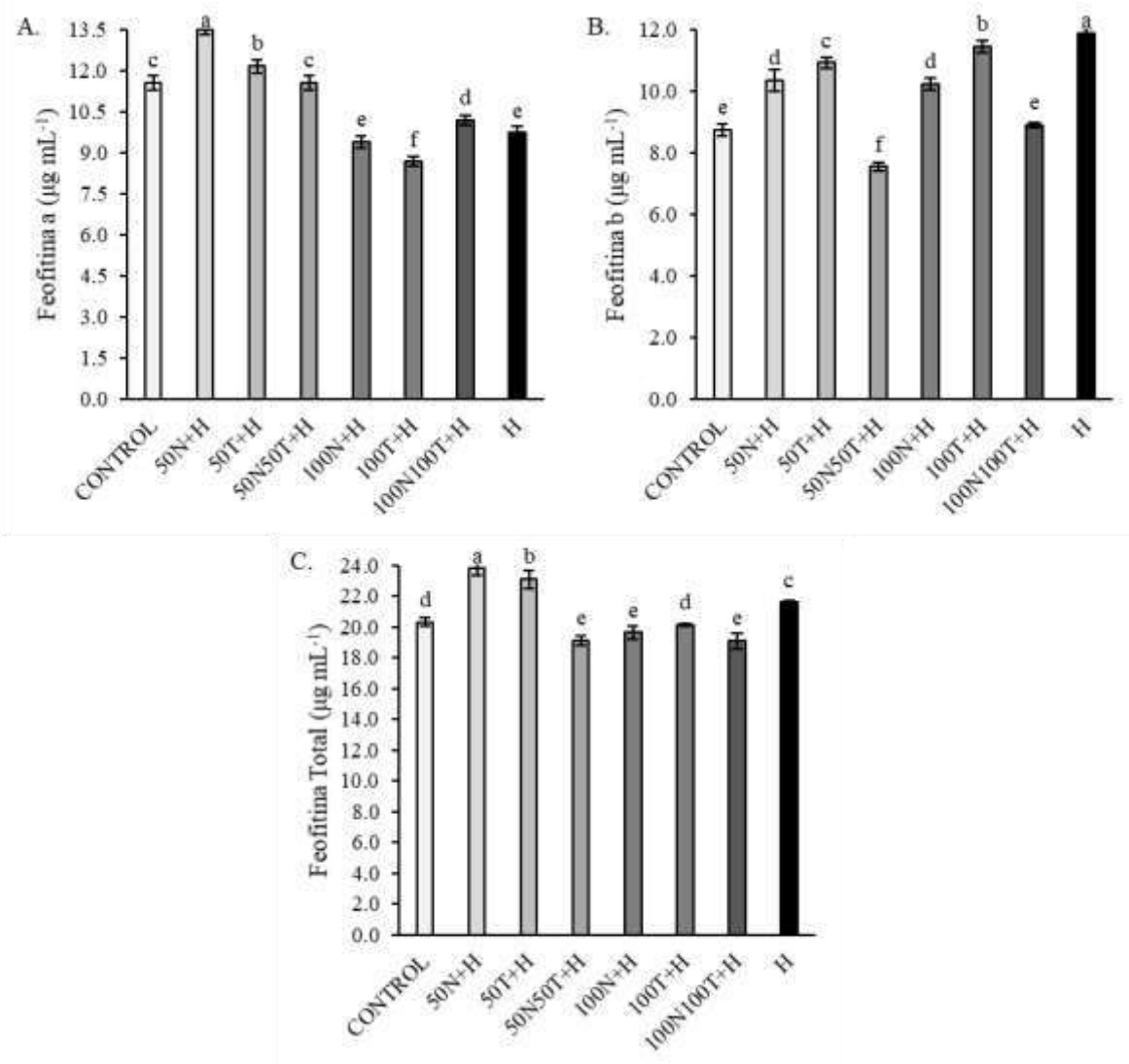


Figura 9. Feofitina a (A), feofitina b (B) e feofitina total (C), de plantas de soja tratadas com soluções vitamínicas e herbicidas. Letras diferentes sobre as barras indicam diferença significativa pelo teste de Skott-Knott com 5% de probabilidade ($p \leq 0,05$). Barras de erro representam desvio padrão ($n = 4$). Control: testemunha; 50N+H: 22,5 g nicotinamida ha^{-1} + herbicidas; 50T+H: 7,5 g tiamina ha^{-1} + herbicidas; 50N50T+H: 22,5 g nicotinamida ha^{-1} + 7,5 g tiamina ha^{-1} + herbicidas L^{-1} ; 100N+H: 45 g nicotinamida ha^{-1} + herbicidas; 100T+H: 15 g tiamina ha^{-1} ; 100N100T+ H: 45 g nicotinamida ha^{-1} + 15 g tiamina ha^{-1} + herbicidas; H: herbicidas.

Para os componentes de produção, a altura de inserção da primeira vagem o tratamento da dose de 50% de nicotinamida (50N+H) apresentou o melhor desempenho com a média de 15 cm, superando em 26,0% os demais tratamentos. Para o número de ramificações o tratamento da mistura da tiamina e nicotinamida na dose de 100% (100N100T+H) proporcionou um ganho de 18,8% em relação ao tratamento somente com

herbicidas. O tratamento da dose de 50% de nicotinamida (50N+H) desempenhou um ganho de 21,7% de número de vagens por planta, entre os demais tratamentos. Enquanto que o tratamento na dose de 100% de tiamina (100T+H) obteve-se um ganho de 15,7% entre os demais tratamentos.

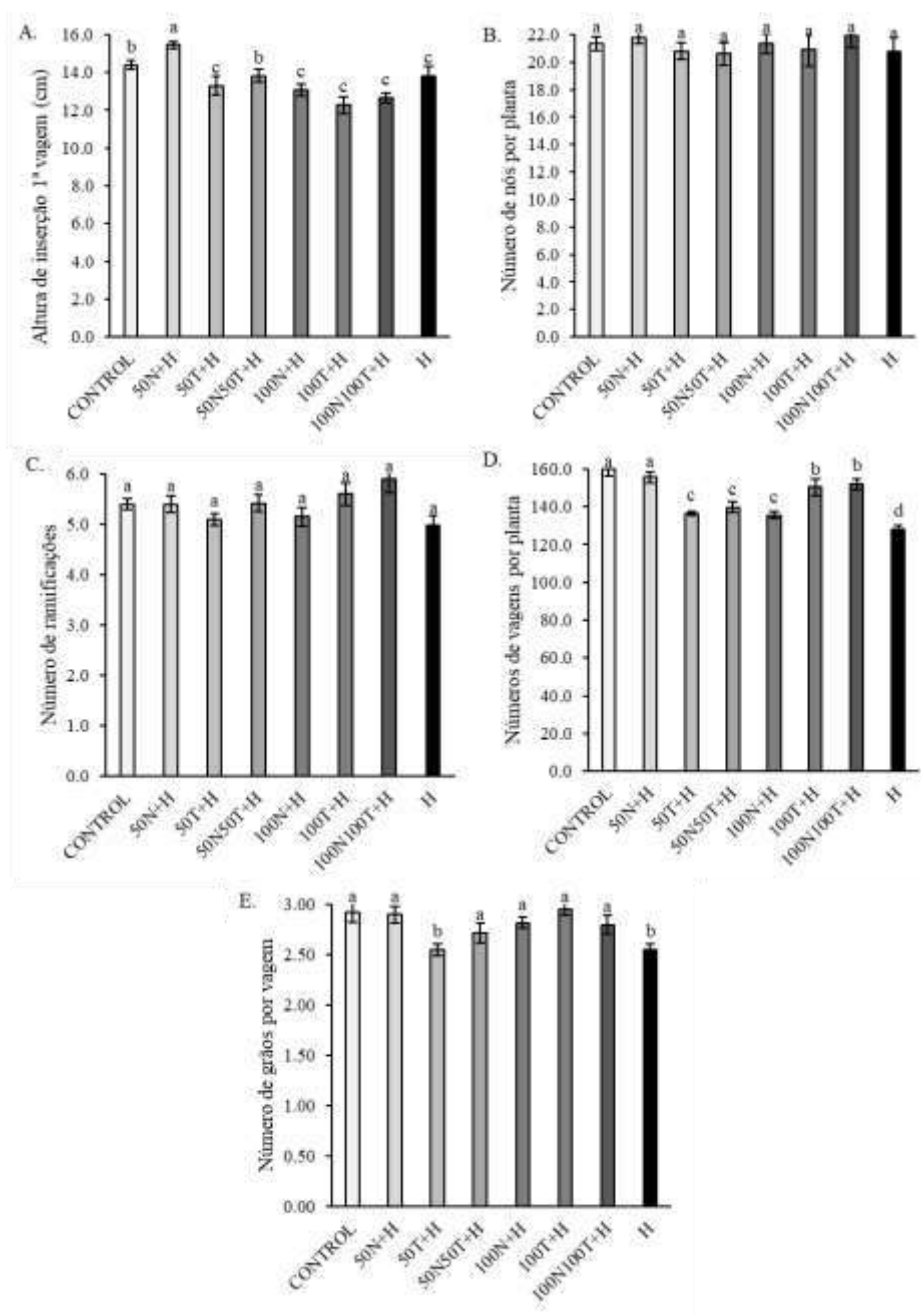


Figura 10. Altura de inserção de primeira vagem (A) e número de nós por planta (B), número de ramificações (C), número de vagens por planta (D) e número de grãos por vagem (E) de plantas de soja tratadas com soluções vitamínicas e herbicidas. Letras diferentes sobre as barras indicam diferença significativa pelo teste de Skott-Knott com 5% de probabilidade ($p \leq 0,05$). Barras de erro representam desvio padrão ($n = 4$). Control: testemunha; 50N+H: 22,5 g nicotinamida ha^{-1} +

herbicidas; 50T+H: 7,5 g tiamina ha^{-1} + herbicidas; 50N50T+H: 22,5 g nicotinamida ha^{-1} + 7,5 g tiamina ha^{-1} + herbicidas L^{-1} ; 100N+H: 45 g nicotinamida ha^{-1} + herbicidas; 100T+H: 15 g tiamina ha^{-1} ; 100N100T+H: 45 g nicotinamida ha^{-1} + 15 g tiamina ha^{-1} + herbicidas; H: herbicidas.

Para a massa de 1.000 grãos, o tratamento com a dose completa de nicotinamida e tiamina (100N100T+H), obteve o melhor desempenho com um ganho de 3,49%, entre os demais tratamentos. Enquanto que, para produtividade de grãos, o tratamento com metade da dose de nicotinamida (50N+H), promoveu rendimento 22,37% superior ao uso apenas de herbicidas, e valor igual a testemunha. Todos os demais tratamentos com vitaminas, exceto com a mistura de nicotinamida mais tiamina em dose completa, foram superiores ao uso apenas de herbicidas, mas não atingiram a produtividade da testemunha.

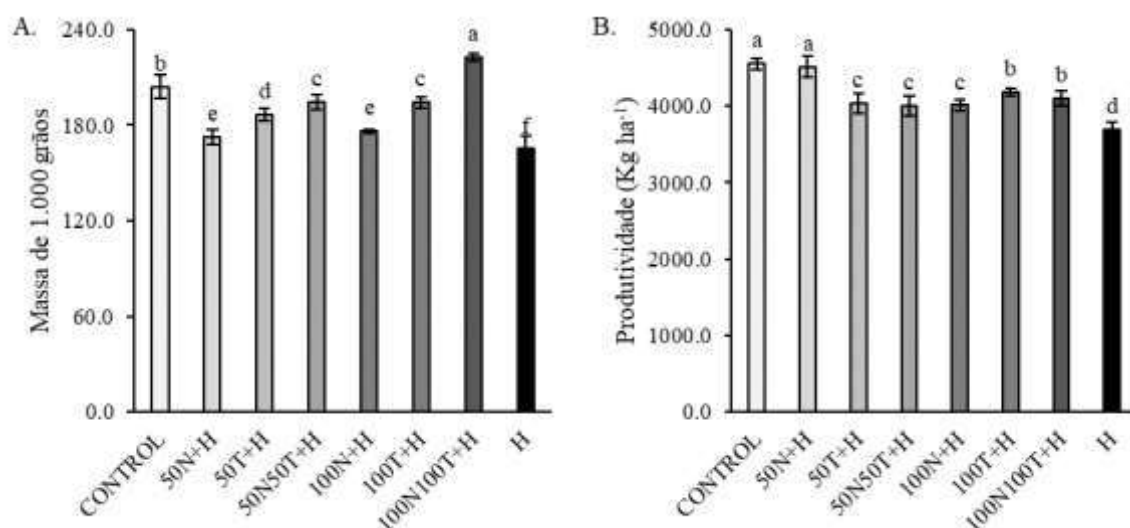


Figura 11. Massa de 1.000 grãos (A) e produtividade (B), de plantas de soja tratadas com soluções vitamínicas e herbicidas. Letras diferentes sobre as barras indicam diferença significativa pelo teste de Skott-Knott com 5% de probabilidade ($p \leq 0,05$). Barras de erro representam desvio padrão ($n = 4$). Control: testemunha; 50N+H: 22,5 g nicotinamida ha^{-1} + herbicidas; 50T+H: 7,5 g tiamina ha^{-1} + herbicidas; 50N50T+H: 22,5 g nicotinamida ha^{-1} + 7,5 g tiamina ha^{-1} + herbicidas L^{-1} ; 100N+H: 45 g nicotinamida ha^{-1} + herbicidas; 100T+H: 15 g tiamina ha^{-1} ; 100N100T+H: 45 g nicotinamida ha^{-1} + 15 g tiamina ha^{-1} + herbicidas; H: herbicidas.

5. DISCUSSÃO

5.1 Características fitotécnicas

Os efeitos positivos da aplicação de nicotinamida e tiamina isoladamente, sobre os caracteres fitotécnicos ocorreu, devido ao efeito fitotóxico de herbicidas sobre as plantas,

em que ocorrem alterações no metabolismo, como redução da biomassa e interferindo negativamente no desenvolvimento das plantas de soja (Figura 4). Muitos herbicidas podem causar acúmulo de espécies reativas de oxigênio e podem atuar como principais causadores de danos (Szechyńska-Hebda et al., 2022; Traxler et al., 2023), assim como observado no presente estudo.

É possível que durante esses estresses abióticos, uma série de eventos internos ocorram nas plantas, sinalizando a necessidade de ativação dos sistemas de defesa, com intuito de amenizar a produção de espécies reativas de oxigênio (ERO) (Gou et al., 2023). A nicotinamida está associada à sinalização de estresse, induzindo ou regulando o acúmulo de metabólitos secundários e a ação do metabolismo de defesa das plantas (Zaki et al., 2022).

Assim, as plantas aumentam a concentração de nicotinamida após situações que causam estresse e, através dessa vitamina que é precursora do NAD^+ , os níveis de ácido indolacético são elevados e estão diretamente relacionado à divisão celular (Kirkland et al., 2018; Mohamed et al., 2020), proporcionando maior atenuação aos tecidos vegetais dos danos celulares causados pelos herbicidas (Bernardo et al., 2024) (Figura 4), o que reflete nos tratamentos compostos pela mesma, o que ocorreu um ganho nas variáveis altura, diâmetro e índice relativo de clorofila em relação ao tratamento com herbicidas.

A tiamina é um precursor de hormônios e nas plantas, também atua como cofator na biossíntese de enzimas no ciclo de Calvin e Krebs (Goyer 2010), atenuando os efeitos do estresse na planta, como dos herbicidas, apresentados nesse estudo. Esta vitamina auxilia para a redução das espécies reativas de oxigênio, aumenta ou mantém a síntese de clorofilas (Figura 8), auxilia na produção de compostos antioxidantes e no metabolismo secundário (Figura 10) (Amjad et al. 2021; Jabeen et al. 2021), consequentemente melhorando a capacidade da planta de suportar condições estressantes.

5.2. Trocas gasosas

Os efeitos positivos da aplicação de tiamina, isoladamente ou combinada com niacina sobre a concentração de CO_2 intracelular, eficiência do uso da água e para a eficiência instantânea de carboxilação (Figura 6) é devido, possivelmente essa vitamina atuar na regulação do metabolismo do carbono em plantas e desempenhar papel fundamental como coenzima para regular muitos processos metabólicos nas células (Kamarudin et al., 2017). A aplicação exógena pode interferir na proteção tecidual por

ação antioxidante, o que pode ter favorecido maior concentração de CO₂ (Figura 7), uma vez que esse caráter antioxidante possibilita o bom funcionamento dos processos fotossintéticos, essenciais para obtenção de energia para o crescimento vegetativo e reprodutivo (Kaya et al., 2015).

Dessa forma, a aplicação de nicotinamida e tiamina conferiu maior eficiência nas taxas de conteúdo de CO₂ intracelular nas plantas, pois com menores quantidades de CO₂ intracelular, supõe-se que as plantas sejam mais eficientes metabolicamente, na transpiração, na condutância estomática, na fotossíntese líquida e também na eficiência de carboxilação das plantas de soja (Figura 7A), o que resultou em aumento dos componentes de produção (Figura 14 e 15).

As vitaminas são derivadas de plantas, regulam o metabolismo das mesmas atuando como cofatores enzimáticos (Asensi-Fabado et al., 2010), aumentando a resistência das culturas contra estresses abióticos (Vendruscolo et al., 2024), como os efeitos fitotóxicos dos herbicidas. Foi possível observar esse efeito nas variáveis de eficiência do uso da água e na eficiência intrínseca de carboxilação (Figura 7A e B). Experimentos recentes revelaram o papel benéfico da tiamina no aumento da tolerância das plantas contra estresses abióticos (Alam et al., 2022), como ocorreu neste trabalho (Figura 6A), em que com a aplicação dessa vitamina, as plantas de soja apresentaram maior eficiência no uso da água, em relação ao tratamento com herbicida.

5.3. Pigmentos

Os efeitos favoráveis da nicotinamida e tiamina sobre as clorofilas (Figura 8), ocorrem possivelmente, devido as vitaminas protegerem os cloroplastos do estresse oxidativo, mantendo a integridade e a funcionalidade da membrana do cloroplasto (Vendruscolo et al., 2024).

Os pigmentos de clorofila desempenham um papel importante na coleta de luz e dissipação de energia e também são os principais constituintes do cloroplasto (Ashraf et al., 2013). A tiamina é eficaz na atenuação da produção de espécies reativas de oxigênio e na melhoria do sistema de defesa oxidativa, que pode estar envolvido na proteção do cloroplasto e seus pigmentos em condições adversas, como os estresses abióticos, incluindo injúria de herbicidas (Ghaffar et al., 2019). Essa vitamina atua como cofator para diversas enzimas vegetais apresenta um papel essencial no metabolismo dos carboidratos e é capaz de potencializar o aumento das reservas energéticas, sendo um antioxidante

(Kaya et al., 2015). Além de aumentar os níveis de pigmentos fotossintéticos (Vendruscolo et al., 2021), como apresentado nesse estudo (Figura 8).

A nicotinamida atua contra a oxidação de membranas e organelas que realizam a captação de energia luminosa, além da participação na ativação de enzimas relacionadas à redução do carbono atmosférico, resultando na manutenção ou mesmo aumento de pigmentos como clorofila e antocianinas (Dawood et al., 2019; Mohamed et al., 2020). É um dos osmoprotetores mais estudados, podendo ser produzida em diversos órgãos vegetais, incluindo cloroplastos, onde contribui para a proteção do sistema fotossintético (Ghosh et al., 2022), sendo que NAD^+ está presente em diferentes compartimentos celulares, NADP^+ é encontrado no ambiente citosólico e cloroplasto, sendo um dos motivos em que os tratamentos constituídos por essa vitamina apresentaram as maiores médias (Figura 8).

A preservação aprimorada de clorofilas em plantas de soja permite maior captura de energia luminosa e sua conversão em energia química (Hu et al., 2020; Li et al., 2024), enquanto as feofitinas desempenham um papel de suporte na fotossíntese, absorvendo comprimentos de onda de luz que não são bem capturados pela clorofila, complementando assim a eficiência da fotossíntese (Hu et al., 2020; Li et al., 2024). Os herbicidas podem influenciar a produção de feofitina em plantas inibindo a fotossíntese e interrompendo a cadeia de transporte de elétrons fotossintéticos, a fotossíntese e seus parâmetros relacionados são considerados indicadores cruciais de danos induzidos por herbicidas (Um e Chen et al., 2021).

Estudos têm demonstrado que herbicidas podem diminuir o conteúdo de pigmento fotossintético e a taxa fotossintética líquida do milho (Wang et al., 2018), amendoim (Kharel et al., 2022) e soja (Begović et al., 2023). Isso pode ser devido à superprodução de espécies reativas de oxigênio inibindo a atividade fotoquímica dos cloroplastos e bloqueando a formação de pigmento fotossintético. Outra razão pode ser a degradação da clorofila devido ao dano celular causado pelo acúmulo de espécies reativas de oxigênio.

A proporção de clorofila a para b também pode ser afetada pelo tratamento com herbicida. Alguns estudos notaram mudanças nessa proporção após a aplicação de herbicida, indicando impactos diferenciais na síntese ou degradação desses pigmentos. As plantas que têm menos clorofila e carotenoides não serão capazes de realizar tanta fotossíntese devido ao seu papel como pigmentos coletores de luz e agentes fotoprotetores, respectivamente (Zulficar et al., 2021). Neste estudo, os conteúdos de clorofila e

carotenoides foram significativamente aumentados pelos tratamentos com soluções vitamínicas e herbicidas.

5.6 Componentes de Produção

Os resultados favoráveis ao crescimento da planta, aumento dos componentes de produção e produtividade de grãos (Fig. 10 e 11) foram possíveis devido, as vitaminas possuírem um caráter bioestimulante. A tiamina, desempenha um papel essencial como coenzima em vários processos metabólicos, incluindo a via das pentoses fosfato, o ciclo do ácido tricarboxílico, a formação de aminoácidos ramificados e a glicólise em organismos celulares (Khan et al., 2018; Tan et al., 2022), o que auxilia no desenvolvimento da planta para a produção dos componentes de produção (Figura 11).

A nicotinamida é capaz de estimular o sistema fisiológico das plantas quando aplicado de forma exógena (Colla et al., 2021). Devido a isso, interferiu diretamente nos ganhos do desenvolvimento dos tecidos vegetativos e reprodutivos obtidos no presente estudo (Figura 10 e 11). Essa vitamina está associada à maior atividade de transferência de energia no fotossistema, responsável por transformar a energia luminosa em fotoassimilados utilizados nos processos de carboxilação e divisão celular (Dong et al., 2015), o que resulta em uma ação bioestimulante em plantas submetidas a diferentes condições ambientais, como no presente estudo a injúria causada pelos herbicidas (Figura 11).

O uso de bioestimulantes promotores do crescimento fornece uma grande atenuação para as plantas que estão em condições de estresse, contribuindo com a desintoxicação de espécies reativas de oxigênio e osmorregulação, de modo que maior foi o rendimento e desempenho verificados com os tratamentos compostos por vitaminas (Khan et al., 2020).

Para espécies leguminosas, verificou-se que a aplicação de vitamina B3 aumenta significativamente o crescimento e a produtividade dos grãos de fava, o que está relacionado ao aumento dos níveis de carboidratos, aminoácidos livres, prolina e auxina nos tecidos vegetais (Mohamed et al., 2020).

Os efeitos positivos da aplicação de tiamina, isoladamente ou combinada com a nicotinamida, sobre os componentes de produção (Figuras 14) são estimulados, segundo Kaya et al., 2015, devido à aplicação exógena interferir na proteção tecidual por ação antioxidante, o que pode ter favorecido a maior concentração de pigmentos (Figura 8),

uma vez que esse caráter antioxidante possibilita o bom funcionamento dos processos fotossintéticos, essenciais para obtenção de energia para o crescimento vegetativo e reprodutivo (El-Bassiouny et al., 2018).

A aplicação de tiamina e nicotinamida tem um importante aspecto de interesse para os agricultores, o custo-benefício (Vendruscolo et al., 2018), e pode ser incorporada ao manejo agrícola da soja, uma vez que as respostas de desempenho se mostram semelhantes (Figura 11), em que o tratamento composto pela nicotinamida proporcionou um aumento no rendimento de 17%, em relação ao tratamento somente com herbicidas.

Diante do exposto, os resultados da aplicação da conjunta ou isolada das vitaminas e herbicidas apresentaram benefícios às plantas de soja, mesmo em condições de efeitos deletérios ocasionados por herbicidas, como a injúria inicial da cultura. As vitaminas promoveram uma atenuação da fitotoxicidade dos herbicidas, houve a manutenção e promoção dos pigmentos (Figura 8 e 9), o que permitiu com que a cultura da soja alcançasse os melhores resultados para a massa de mil grãos e a produtividade (Figura 11A). No cenário apresentado no trabalho ocorreu a injúria inicial de herbicidas na cultura da soja, o que interfere significativamente na produtividade das culturas, porém, a utilização das vitaminas demonstraram-se ser eficientes nesse cenário e eficazes na mitigação de danos ocasionados por herbicidas, atenuando os efeitos deletérios.

6. CONCLUSÃO

A aplicação exógena das vitaminas, tiamina e nicotinamida foi capaz de amenizar o efeito fitotóxico da aplicação de herbicidas pós-emergentes na cultura da soja, com destaque quando se utiliza a nicotinamida, na dose de 22,5 g ha⁻¹, a qual incrementou a maioria das características fisiológicas e fitotécnicas.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADEVA-ANDANY, M.M. et al. Enzymes involved in branched-chain amino acid metabolism in humans. **Amino Acids**, v. 49, n. 6, p.1005–28, 2017. doi: 10.1007/s00726-017-2412-7.

ALFOSEA-SIMÓN, M. et al. Physiological, nutritional and metabolomic responses of tomato plants after the foliar application of amino acids aspartic acid, glutamic acid and alanine. **Frontiers in plant science**, v. 11, p. 581234, 2021.

AGHAMOHAMMADI, M., et al. Modeling studies on the role of vitamins B1 (thiamin), B3 (nicotinamide), B6 (pyridoxamine), and caffeine as potential leads for the drug design against COVID-19. **J Mol Model**, v.28, n. 12, p. 380, 2022. doi: 10.1007/s00894-022-05356-9.

AHMAD, M. F. et al. Pesticides impacts on human health and the environment with their mechanisms of action and possible countermeasures. **Heliyon**, 2024.

ALAM, S. S. et al. Enhancement of plant productivity and stress tolerance by the application of an exogenous supply of vitamins. In: **Biostimulants for Crop Production and Sustainable Agriculture**. GB: CABI, 2022. p. 348-371.

ARRUDA, Paulo; BARRETO, Pedro. Lysine catabolism through the saccharopine pathway: enzymes and intermediates involved in plant responses to abiotic and biotic stress. **Frontiers in plant science**, v. 11, p. 587, 2020.

ASENSI-FABADO, M.A.; MUNNÉ-BOSCH S. Vitamins in plants: occurrence, biosynthesis and antioxidant function. **Trend Plant Sci**. 2010; 15:582–592. doi:10.1016/j.tplants.2010.07.003.

ASHRAF, M. H. P. J. C.; HARRIS, P. J. Photosynthesis under stressful environments: An overview. **Photosynthetica**, v. 51, p. 163-190, 2013.

BARBAŚ, P. et al. Assessing Phytotoxic Effects of Herbicides and Their Impact on Potato Cultivars in Agricultural and Environmental Contexts. **Agronomy**, v. 14, n. 1, p. 85, 2023.

Batista-Silva W., et al. (2019). The role of amino acid metabolism during abiotic stress release. **Plant, cell & environment**, v. 42, n. 5, p. 1630–1644.

BEGOVIĆ, L. et al. Photosynthetic efficiency and antioxidative response of soybean exposed to selective herbicides: A field study. **Agriculture**, v. 13, n. 7, p. 1385, 2023.

BERNARDO, V. F. et al. Nicotinamide and phytohormones as biostimulants in common bean. **Revista Ceres**, v. 71, p. e71035, 2024.

BROCHADO, M. G. et al. Can herbicides of different mode of action cause injury symptoms in non-herbicide-tolerant young soybean due to simulated drift?. **Journal of Environmental Science and Health, Part B**, v. 58, n. 12, p. 726-743, 2023.

CARRÃO-PANIZZI, M.C. et al. Extraction time for isoflavone determination. **Braslian Archives of Biology and Technology**, 45, 515-518, 2002.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento, 2024. Acompanhamento da Safra Brasileira: Grãos Safra 2023/24 10º Levantamento. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>. Acesso em: 25 ago. 2024.

CUNHA, F. F. et al. Métodos para estimativa da evapotranspiração de referência para Chapadão do Sul-MS. **Revista Engenharia na Agricultura-Reveng**, v. 21, n. 2, p. 159-172, 2013.

DAWOOD, M. G. et al. Enhancement quality and quantity of faba bean plants grown under sandy soil conditions by nicotinamide and/or humic acid application. **Bulletin of the National Research Centre**, v. 43, p. 1-8, 2019.

DE MALEZAS, Asociación Latinoamericana. Recomendaciones sobre unificación de los sistemas de evaluación en ensayos de control de malezas. **Alam, Bogotá**, v. 1, n. 1, p. 35-38, 1974.

DONG, K. et al. Improvement of plant quality by amino acid transporters: A comprehensive review. **Plant Physiology and Biochemistry**, p. 109084, 2024.

DONG, W. et al. Enhancement of thiamin content in *Arabidopsis thaliana* by metabolic engineering. **Plant and Cell Physiology**, v. 56, n. 12, p. 2285-2296, 2015.

DUBREUIL, V. et al. Os tipos de climas anuais no Brasil: uma aplicação da classificação de Köppen de 1961 a 2015. **Confins. Revue franco-brésilienne de géographie/Revista franco-brasilera de geografia**, n. 37, 2018.

EDWARDS, T. et al. The phytotoxicity of soil-applied herbicides is enhanced in the first-year post strategic deep tillage. *Soil and Tillage Research*, v. 231, p. 105734, 2023.

EL-BASSIOUNY, H. M. S. et al. Role of arbuscular mycorrhiza, alpha-tocopherol and nicotinamide on the nitrogen containing compounds and adaptation of sunflower plant to Water stress. **Bioscience Research**, v. 15, n. 3, p. 2068-2088, 2018.

FERREIRA, D. F. SISVAR: A computer analysis system to fixed effects split plot type designs. **Brazilian Journal of Biometrics**, v. 37, n. 4, p. 529-535, 2019.

FERREIRA, E. S. et al. Vitamin B3 with action on biological oxide/reduction reactions and growth biostimulant in *Chlorella vulgaris* cultivation. **Algal Research**, v. 76, p. 103306, 2023.

GAO, Z. et al. GmPIN-dependent polar auxin transport is involved in soybean nodule development. **The Plant Cell**, v. 33, n. 9, p. 2981-3003, 2021.

GARZA-ULLOA, H. et al. Determination of amino acids in wort and beer by reverse-phase high-performance liquid chromatography. **Journal of the American Society of Brewing Chemists**, v. 44, n. 2, p. 47-51, 1986.

GAWLIK-DZIKI, U. et al. Herbicide resistance status impacts the profile of non-anthocyanin polyphenolics and some phytomedicinal properties of edible cornflower (*Centaurea cyanus* L.) flowers. **Scientific Reports**, v. 13, n. 1, p. 11538, 2023.

GERDES, S. et al. Plant B vitamin pathways and their compartmentation: a guide for the perplexed. **Journal of experimental botany**, v. 63, n. 15, p. 5379-5395, 2012.

GHAFFAR, ADEEL et al. Thiamin-induced variations in oxidative defense processes in white clover (*Trifolium repens* L.) under water deficit stress. **Turkish Journal of Botany**, v. 43, n. 1, p. 58-66, 2019.

GHOSH, U. K. et al. Proline, a multifaceted signalling molecule in plant responses to abiotic stress: understanding the physiological mechanisms. **Plant Biology**, v. 24, n. 2, p. 227-239, 2022.

GOYER, A. Thiamine in plants: aspects of its metabolism and functions. **Phytochemistry**, v. 71, n. 14-15, p. 1615-1624, 2010.

GUO, W. et al. Reactive oxygen species: a crosslink between plant and human eukaryotic cell systems. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 24, n. 17, p. 13052, 2023.

HORVATH, D. P. et al. Weed-induced crop yield loss: a new paradigm and new challenges. **Trends in Plant Science**, v. 28, n. 5, p. 567-582, 2023.

HRUBŠA, M. et al. Biological properties of vitamins of the B-complex, part 1: Vitamins B1, B2, B3, and B5. **Nutrients**, v. 14, n. 3, p. 484, 2022.

HSU, Ching-Yun et al. The antioxidant and free radical scavenging activities of chlorophylls and pheophytins. **Food and Nutrition Sciences**, v. 4, n. 8, p. 1-8, 2013.

HU, S. et al. Sensitivity and responses of chloroplasts to heat stress in plants. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, p. 375, 2020.

JABBARI, M.; JABBARI, A. Antioxidant potential and DPPH radical scavenging kinetics of water-insoluble flavonoid naringenin in aqueous solution of micelles. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 489, p. 392-399, 2016.

JABEEN, M. et al. Thiamin stimulates growth and secondary metabolites in turnip (*Brassica rapa* L.) leaf and root under drought stress. **Physiologia Plantarum**, v. 172, n. 2, p. 1399-1411, 2021.

JABEEN, M. et al. Thiamin stimulates growth, yield quality and key biochemical processes of cauliflower (*Brassica oleracea* L. var. Botrytis) under arid conditions. **Plos one**, v. 17, n. 5, p. e0266372, 2022.

KAMARUDIN, A. N. et al. Enhancement of thiamine biosynthesis in oil palm seedlings by colonization of endophytic fungus *Hendersonia toruloidea*. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, p. 1799, 2017.

KANG, Yu-Ra et al. Synthesis, characterization, and functional properties of chlorophylls, pheophytins, and Zn-pheophytins. **Food chemistry**, v. 245, p. 943-950, 2018.

KAUSAR, A. et al. Alleviation of drought stress through foliar application of thiamine in two varieties of pea (*Pisum sativum* L.). **Plant Signaling & Behavior**, v. 18, n. 1, p. 2186045, 2023.

KAYA, C. et al. Exogenous application of thiamin promotes growth and antioxidative defense system at initial phases of development in salt-stressed plants of two maize cultivars differing in salinity tolerance. **Acta physiologiae plantarum**, v. 37, p. 1-12, 2015.

KENDZIOREK, M. et al. Differential regulation of alanine aminotransferase homologues by abiotic stresses in wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings. **Plant cell reports**, v. 31, p. 1105-1117, 2012.

KHAN, N. et al. Role of sugars, amino acids and organic acids in improving plant abiotic stress tolerance. **Pak. J. Bot**, v. 52, n. 2, p. 355-363, 2020.

KHAN, R. et al. Exogenous application of chitosan and humic acid effects on plant growth and yield of pea (*Pisum sativum*). **Int. J. Biosci**, v. 12, n. 5, p. 43-50, 2018.

KHAREL, P. et al. Influence of planting date, row spacing, and reduced herbicide inputs on peanut canopy and sicklepod growth. **Agronomy Journal**, v. 114, n. 1, p. 717-726, 2022.

KIKUTA, S. The cytotoxic effect of genistein, a soybean isoflavone, against cultured tribolium cells. **Insects**, v. 11, n. 4, p. 241, 2020.

KIRKLAND, J. B. et al. Niacin. In: **Advances in food and nutrition research**. Academic Press, 2018. p. 83-149.

KU, Yee-Shan et al. Understanding the composition, biosynthesis, accumulation and transport of flavonoids in crops for the promotion of crops as healthy sources of flavonoids for human consumption. **Nutrients**, v. 12, n. 6, p. 1717, 2020.

KUMAR, R. et al. Evaluating the imazethapyr herbicide mediated regulation of phenol and glutathione metabolism and antioxidant activity in lentil seedlings. **PeerJ**, v. 12, p. e16370, 2024.

LI, X. et al. Effects of abiotic stress on chlorophyll metabolism. **Plant Science**, p. 112030, 2024.

LICHTENTHALER, H. K. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. In: **Methods in enzymology**. Academic Press, 1987. p. 350-382.

LIMA, S. F. et al. Nicotinamide as a biostimulant improves soybean growth and yield. **Open Agriculture**, v. 9, n. 1, p. 20220259, 2024.

LUO, Q. et al. Proline Metabolism in Response to Climate Extremes in Hairgrass. **Plants**, v. 13, n. 10, p. 1408, 2024.

MISHRA, R. et al. Soybean (*Glycine max* L. Merrill): A Multipurpose Legume Shaping Our World. **Plant Cell Biotechnology And Molecular Biology**, v. 25, n. 3-4, p. 17-37, 2024.

MOHAMED, M. H. et al. Effect of garlic extract, ascorbic acid and nicotinamide on growth, some biochemical aspects, yield and its components of three faba bean (*Vicia faba* L.) cultivars under sandy soil conditions. **Bulletin of the National Research Centre**, v. 44, p. 1-8, 2020.

MU, X.; CHEN, Y. The physiological response of photosynthesis to nitrogen deficiency. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 158, p. 76-82, 2021.

NAGARAJAN, S. et al. Antioxidant activity of synthetic polymers of phenolic compounds. **Polymers**, v. 12, n. 8, p. 1646, 2020.

NATH, C. P. et al. Challenges and alternatives of herbicide-based weed management. **Agronomy**, v. 14, n. 1, p. 126, 2024.

PEREIRA, V. et al. Flavonoids as Insecticides in Crop Protection—A Review of Current Research and Future Prospects. **Plants**, v. 13, n. 6, p. 776, 2024.

ROJAS, C. M. et al. Regulation of primary plant metabolism during plant-pathogen interactions and its contribution to plant defense. **Frontiers in plant science**, v. 5, p. 17, 2014.

Roje, S. (2007). Vitamin B biosynthesis in plants. **Phytochemistry**, 68(14), 1904-1921.

SANTOS, H.G. et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, DF: Embrapa, 2018., 2018.

SHEN, N. et al. Plant flavonoids: Classification, distribution, biosynthesis, and antioxidant activity. **Food chemistry**, v. 383, p. 132531, 2022.

SIAMABELE, B. The significance of soybean production in the face of changing climates in Africa. **Cogent Food & Agriculture**, v. 7, n. 1, p. 1933745, 2021.

SILVA COLLA, Raphael Elias et al. Does foliar nicotinamide application affect second crop corn (*Zea mays*)?. **Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias UNCuyo**, v. 53, n. 2, p. 64-70, 2021.

SZECHYŃSKA-HEBDA, M. et al. To be or not to be? Are reactive oxygen species, antioxidants, and stress signalling universal determinants of life or death?. **Cells**, v. 11, n. 24, p. 4105, 2022.

TAN, C. et al. Effects of exogenous sucrose and selenium on plant growth, quality, and sugar metabolism of pea sprouts. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 102, n. 7, p. 2855-2863, 2022.

TEGEDER, M.; MASCLAUX-DAUBRESSE, C. Source and sink mechanisms of nitrogen transport and use. **New phytologist**, v. 217, n. 1, p. 35-53, 2018.

TRAXLER, C. et al. The nexus between reactive oxygen species and the mechanism of action of herbicides. **Journal of Biological Chemistry**, p. 105267, 2023.

VENDRUSCOLO, E. P. et al. Aplicação de niacina ou tiamina promovem incremento no desenvolvimento de mostarda. **Revista Cultura Agronômica**, v. 26, n. 3, p. 433-442, 2017.

VENDRUSCOLO, E. P. et al. Chlorophyll concentration and production of *Urochloa decumbens* treated with diazotrophic bacteria and thiamine in the Brazilian Cerrado. **Tropical Grasslands-Forrajes Tropicales**, v. 9, n. 1, p. 134-137, 2021.

VENDRUSCOLO, E. P. et al. Tratamento de sementes com niacina ou tiamina promove o desenvolvimento e a produtividade do feijoeiro. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 17, n. 1, p. 83-90, 2018.

VENDRUSCOLO, E. P. *et al.* Vitamins can ameliorate the effects of water deficit on the gas exchange and initial growth of maize. **Journal of Crop Science and Biotechnology**, p. 1-9, 2024.

VENDRUSCOLO, E. P.; SELEGUINI, A. Effects of vitamin pre-sowing treatment on sweet maize seedlings irrigated with saline water. **Acta Agronômica**, v. 69, n. 1, p. 20-25, 2020.

WANG, J. et al. Photosynthesis and physiology responses of paired near-isogenic lines in waxy maize (*Zea mays* L.) to nicosulfuron. **Photosynthetica**, v. 56, n. 4, p. 1059-1068, 2018.

XU, Yixiang et al. Physicochemical, structural, and functional properties of hemp protein vs several commercially available plant and animal proteins: A comparative study. **ACS Food Science & Technology**, v. 2, n. 10, p. 1672-1680, 2022.

YANG, Q. et al. Connections between amino acid metabolisms in plants: lysine as an example. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, p. 928, 2020.

YANG, Qing-Qing et al. A connection between lysine and serotonin metabolism in rice endosperm. **Plant physiology**, v. 176, n. 3, p. 1965-1980, 2018.

ZAKI, F. S. A et al. The impact of α -tocopherol and nicotinamide on performance of lupine plant grown under sandy soil conditions. **Egyptian Journal of Chemistry**, v. 65, n. 132, p. 1231-1240, 2022.

ZHANG, P. et al. Variation in rotenone and deguelin contents among strains across four tephrosia species and their activities against aphids and whiteflies. **Toxins**, v. 14, n. 5, p. 339, 2022.

ZULFIQAR, S. et al. Role of carotenoids in photosynthesis. **Carotenoids: Structure and function in the human body**, p. 147-187, 2021.

CAPÍTULO 2 - VITAMINAS PROMOTORAS DO SISTEMA SECUNDÁRIO E AMINOÁCIDOS EM PLANTAS DE SOJA COM INJÚRIA DE HERBICIDAS PÓS-EMERGENTES

RESUMO: A soja é uma leguminosa com grande importância econômica, mas sua produção é altamente dependente do manejo eficaz das plantas daninhas, mas na maioria das vezes, ocorre injúrias na cultura devido aos herbicidas utilizados. Visando melhorar a eficiência do manejo e verificar se existe interferência dos herbicidas na produção de flavonoides e aminoácidos objetivou-se neste estudo avaliar os efeitos da aplicação exógena de tiamina e nicotinamida na produção de aminoácidos e flavonoides em plantas de soja submetidas à aplicação de herbicidas pós-emergentes. Foi utilizado o delineamento experimental em blocos casualizados, com oito tratamentos e quatro repetições. Os tratamentos consistiram em doses de 7,5 g e 15 g ha⁻¹ de tiamina, e doses de 22,5 e 45 g ha⁻¹ de nicotinamida, associadas com os herbicidas Fomesafem (227,70 g i.a. ha⁻¹) + S-Metolacoloro (1040,00 g i.a. ha⁻¹) + Clomazona (540,00 g i.a. ha⁻¹) e um tratamento somente com os herbicidas. Foram avaliados os teores de aminoácidos e flavonoides. A tiamina isoladamente ou combinada com a nicotinamida promoveram maiores valores para os flavonoides e aminoácidos, quando comparado com o tratamento de herbicida. A aplicação exógena das vitaminas, tiamina e nicotinamida foi capaz de amenizar a injúria da aplicação de herbicidas pós-emergente na cultura da soja, com destaque quando se utiliza a nicotinamida, na dose de 22,5 g ha⁻¹, e a tiamina, na dose de 7,5 g ha⁻¹ a qual incrementou na maioria dos flavonoides e aminoácidos. a qual incrementou a maioria dos flavonoides e aminoácidos.

Palavras-Chave: *Glycine max*; Estresse oxidativo; Vitaminas do complexo B;

ABSTRACT: Soybean is a legume with great economic importance, but its production is highly dependent on effective weed management, but most of the time, crop injuries occur due to the herbicides used. Aiming to improve management efficiency and verify whether there is interference of herbicides in the production of flavonoids and amino acids, the objective of this study was to evaluate the effects of exogenous application of thiamine and nicotinamide on the production of amino acids and flavonoids in soybean plants subjected to the application of post-emergence herbicides. A randomized block experimental design was used, with eight treatments and four replications. The treatments consisted of doses of 7.5 g and 15 g ha⁻¹ of thiamine, and doses of 22.5 and 45 g ha⁻¹ of nicotinamide, associated with the herbicides Fomesafem (227.70 g a.i. ha⁻¹) + S-Metolachlor (1040.00 g a.i. ha⁻¹) + Clomazone (540.00 g a.i. ha⁻¹) and a treatment with the herbicides alone. The levels of amino acids and flavonoids were evaluated. Thiamine alone or combined with nicotinamide promoted higher values for flavonoids and amino acids, when compared with the herbicide treatment. The exogenous application of vitamins, thiamine and nicotinamide was able to alleviate the injury caused by the application of post-emergence herbicides in soybean crops, especially when nicotinamide was used at a dose of 22.5 g ha⁻¹, and thiamine, at a dose of 7.5 g ha⁻¹ which increased the majority of flavonoids and amino acids.

KEYWORDS: *Glycine max*; Oxidative stress; B vitamins.

1. INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max* L.) é uma cultura com grande importância no mundo, principalmente devido às suas propriedades nutricionais, que incluem proteínas, aminoácidos, fibras, minerais, vitaminas, isoflavonas benéficas ao homem e as plantas. Fornece alimentos, óleo de semente e outros ingredientes valiosos (Jiang et al., 2020; Yang et al., 2023). No entanto, existem fatores que interferem o rendimento da produção da cultura, como as plantas daninhas (Ahmad et al., 2020; Ren et al., 2023). Para a realização do manejo das plantas daninhas são utilizados herbicidas, que em na maioria dos casos ocasionam injúrias em plantas de soja, como o estresse oxidativo (Teimouri et al., 2022).

Como consequência, as plantas produzem diversos metabólitos secundários para eliminar as ERO (espécies reativas de oxigênio), estimulando assim o crescimento e o desenvolvimento e resistindo a estresses bióticos e abióticos (Gapper e Dolan, 2006; Rizwan et al., 2024). Dentre os compostos do metabolismo secundários tem-se os flavonoides, em paprticular as isoflavonas, que representam as propriedades promotoras da saúde vegetal que são sintetizados em toda a planta de soja (Wang et al., 2024).

Esses compostos possuem propriedades antioxidantes e promovem resistência a doenças em plantas (Roy et al., 2022). Para a saúde humana, o consumo de produtos agrícolas ricos em flavonoides promove melhorias em diversas atividades biológicas, incluindo antioxidante, anti-inflamatória e neuroprotetora, uma vez que tem sido considerado crucial no tratamento de doenças do sistema nervoso central (Yang et al., 2024).

Além desse mecanismo de defesa, os aminoácidos são constituintes de proteínas e precursores de diversos reguladores do metabolismo vegetal (Dong et al., 2024), incluindo as biossínteses dos sistemas antioxidantes. São promotores e catalisadores para a síntese de várias enzimas em plantas, atuam como intermediários de metabólitos finais em certas vias metabólicas, além de participar da regulação de múltiplas vias metabólicas e outras vias fisiológicas e bioquímicas, afetando assim vários processos fisiológicos nas plantas (Amir et al., 2018; Yang et al., 2018; Gaweda et al., 2024). Para se adaptar às mudanças ambientais, as plantas têm mecanismos complexos em seus corpos para a absorção, síntese, reciclagem, reutilização e transporte de aminoácidos para cada órgão (Tegeder e Masclaux-Daubresse, 2018).

Visando a promoção na produção de flavonoides e aminoácidos, as vitaminas do complexo B, têm função promotora da biossíntese dos compostos antioxidantes, possuem caráter bioestimulantes, mas ainda são pouco exploradas (Vendruscolo et al., 2024). Dentre estas vitaminas, a nicotinamida apresenta estreita relação com a capacidade fotossintética das plantas, sendo parte constituinte do NAD e NADH (Ferreira et al., 2023). Além disso, está associada à sinalização de estresse, induzindo ou regulando o acúmulo de metabólitos secundários e a ação do metabolismo de defesa da planta (Zaki et al., 2022). Assim, as plantas podem aumentar a concentração de nicotinamida após situações que causam estresse oxidativo e induzam o metabolismo defensivo (Smolik et al., 2024).

A tiamina (vitamina B1) é um composto essencial para todos os organismos vivos, que é formado pelo acoplamento de pirimidina e tiazol sintetizados separadamente em plastídios (Gerdes et al., 2012; Hylander et al., 2024). É um estimulante de crescimento que atua como um cofator em muitos mecanismos dinâmicos de plantas (Colinas, Fetzpatrick, 2015). Atua também como um antioxidante para aliviar espécies reativas de oxigênio (ERO) (Du e Wang, 2011). Assim, objetivou-se avaliar os efeitos da aplicação exógena de tiamina e nicotinamida na produção de flavonoides e aminoácidos em plantas de soja submetidas à aplicação de herbicidas pós-emergentes.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Localização e clima

Um experimento de campo foi realizado na área experimental da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, em Chapadão do Sul – MS, com latitude 18°46' 44" Sul, longitude 52° 36' 59" Oeste e altitude de 820 metros, na safra 23/24. O clima da região é categorizado como tropical úmido (Aw), de acordo com a classificação de Köppen, sendo estação chuvosa no verão e seca no inverno (Dubreuil et al., 2018). A precipitação pluvial média é de 1.850 mm, com temperatura média anual de 13°C a 29°C (Cunha et al., 2013).

Foram obtidos os dados de temperatura e precipitação durante o período de condução do experimento (Figura 1). O solo da região é classificado como Latossolo Vermelho Distrófico argiloso (Santos et al., 2018), tendo características na camada de 0 - 0,20 m: pH (CaCl₂ = 5,4; Al trocável (cmol_c dm⁻³) = 0,05; Ca+Mg (cmol_c dm⁻³) = 6,30; P (mg dm⁻³) = 18,3; K (mg dm⁻³) = 52,0; Matéria orgânica (g dm⁻³) = 27,4; V (%) = 68,2; m (%) = 0,0; Soma de bases (cmol_c dm⁻³) = 4,1; CTC (cmol_c dm⁻³) = 9,4.

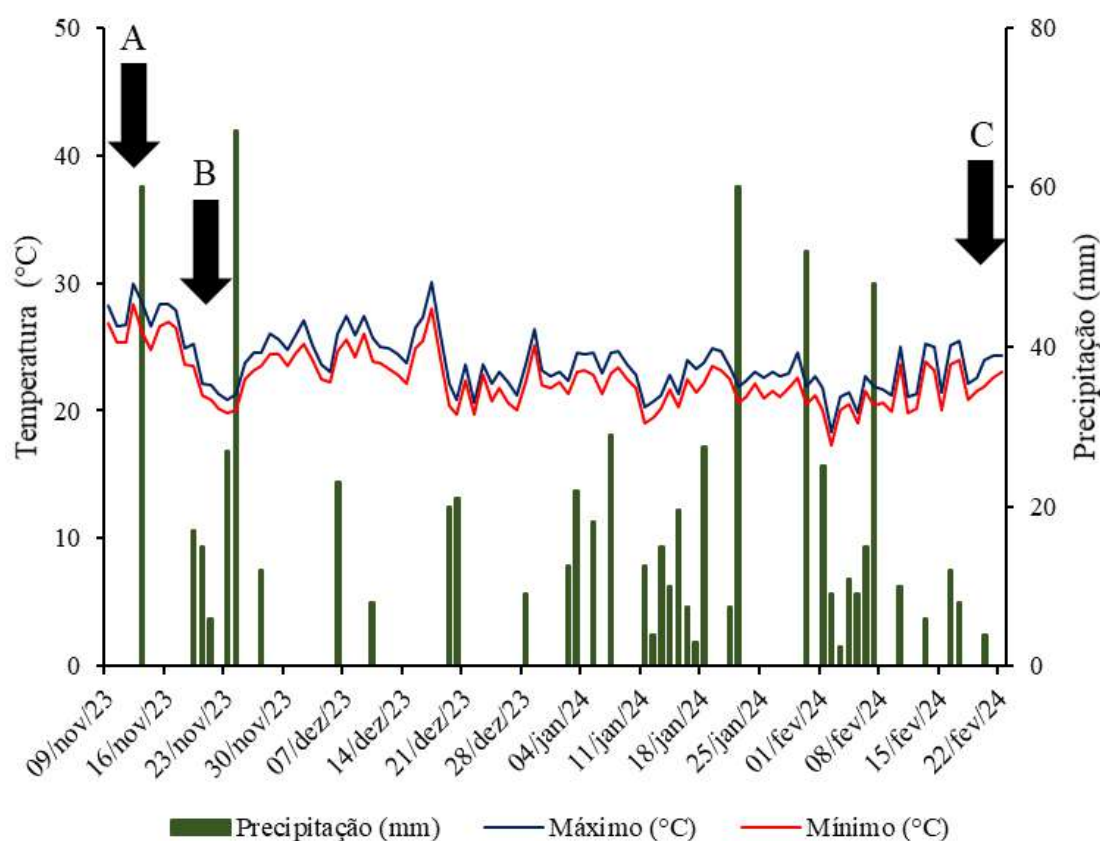


Figura 2. Semeadura da cultura (A), aplicação da soluções vitamínicas e herbicidas vitamínica com os herbicidas (B), colheita do experimento (C), índice pluviométrico, temperatura máxima e mínima na área experimental do Campus da Universidade Federal do Mato Grosso do Sul - MS, durante o período de novembro de 2023 a fevereiro de 2024. Fonte: Inmet.

2.2. Preparo do solo e material vegetal

Não houve necessidade de correção do solo. Antes da semeadura da cultura da soja, foi feita a dessecação da área total, as plantas daninhas foram dessecadas com glifosato na dose de 1,11 kg equivalente ácido (i.a.) ha^{-1} . A semeadura foi realizada no mês de novembro, com uma semeadora mecanizada de quatro linhas. eJuntamente com a distribuição das sementes, foi aplicado 180 kg ha^{-1} de P_2O_5 . Foi utilizado a cultivar Olimpo, com 11 sementes por metro. As sementes foram tratadas com o Tiametoxam 350 g L^{-1} , Metalaxil-M 10 g L^{-1} e Fludioxonil 25 g L^{-1} e inoculada com um inoculante líquido para soja, *Bradyrhizobium japonicum* (SEMIA 5080) e *Bradyrhizobium elkanii* (SEMIA 587).

As parcelas experimentais foram constituídas por cinco fileiras de 5 m de comprimento, espaçadas de 0,50 m entre si. As três fileiras centrais foram utilizadas para as avaliações.

2.3. Delineamento experimental e aplicação

O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados com oito tratamentos e quatro repetições, totalizando 32 parcelas. Foram utilizadas doses de 7,5 e 15 g ha⁻¹ de tiamina, sendo 50% e 100%, respectivamente e doses de 22,5 e 45 g ha⁻¹ de nicotinamida, sendo 50% e 100%, respectivamente. As concentrações utilizadas foram baseadas na literatura. Para nicotinamida (Vendruscolo et al., 2017) e tiamina (Vendruscolo e Seleguini, 2020). Junto as vitaminas foram associadas os herbicidas Fomesafem (227,70 g i.a. ha⁻¹) + S-Metolaclo (1040,00 g i.a. ha⁻¹) + Clomazona (540,00 g i.a. ha⁻¹), sendo um tratamento somente com os herbicidas.

Tabela 1. Descrição dos tratamentos do experimento de plantas de soja tratadas com soluções vitamínicas e herbicidas.

Tratamentos	Doses
Controle	Testemunha
50N+H	22,5 g nicotinamida ha ⁻¹ + herbicidas
50T+H	7,5 g tiamina ha ⁻¹ + herbicidas
50N50T+H	22,5 g nicotinamida ha ⁻¹ + 7,5 g tiamina ha ⁻¹ + herbicidas
100N+H	45 g nicotinamida ha ⁻¹ + herbicidas
100T+H	15 g tiamina ha ⁻¹ + herbicidas
100N100T+H	45 g nicotinamida ha ⁻¹ + 15 g tiamina ha ⁻¹ + herbicidas
H	Herbicidas

Os produtos isolados e suas combinações foram aplicados no estágio V1 da cultura, utilizando um pulverizador costal pressurizado a CO₂, com seis pontas (TT 110.015), sob pressão constante de 1,8 bar, monitorada por manômetro na barra de pulverização, e velocidade de 1,0 ms⁻¹, a taxa de aplicação foi equivalente a 170 L/ha⁻¹, temperatura (°C) 26 e umidade relativa 72%.

2.4 Adubação de cobertura e manejo fitossanitário

No estágio V3, foram aplicados 100 kg ha⁻¹ de K₂O em cobertura. Foram realizadas aplicações de inseticidas nos estádios de V5, R1, R4 e R5, com produtos e doses de 750 mL ha⁻¹ de Etiprole, 100 ml ha⁻¹ *Beauveria Bassiana* isolado Simbi BB 15, 100 mL ha⁻¹ de Clorantniliprole, 80 mL ha⁻¹ de Lambda-cialotrina, 300 g ha⁻¹ de Acetamiprido e Bifentrina, visando o controle de *Diabrotica speciosa* (vaquinha), *Bemisia tabaci* (mosca-branca), *Spodoptera eridania* (lagarta das folhas) e *Euchistus heros* (percevejo marrom). Os fungicidas foram aplicados nos estádios V5, R1, R4 e R5, utilizando os produtos Mancozebe 1,5 kg ha⁻¹; 300 mL ha⁻¹ de Picoxistrobina e Ciproconazol; 250 g ha⁻¹ de Azoxistrobina e Benzovindiflupir, para o controle principal da ferrugem asiática.

2.5 Avaliações

2.6. Análise de cromatografia líquida para quantificação de aminoácidos

Quando as plantas estavam no estágio R1, foi realizado a extração dos aminoácidos. Para a extração dos aminoácidos 50 mg das amostras secas e moídas serão submetidas a hidrólise ácida com ácido clorídrico a 6 N em blocos de digestão a 110° C por 24 horas. Posteriormente, uma alíquota de 50 µL será transferida para um vial e mantido em dessecador com sílica gel e sob vácuo por aproximadamente 16 horas, ou até completa secura do solvente.

As amostras serão submetidas a derivatização por meio de AccQ.Fluor reagente (6-aminoquinolil-N-hidroxissuccinimidil carbamato - AQC), adquirido na forma de Kit (Waters®), que é composto pelo derivatizante e seu diluente, solução tampão borato para dissolução das amostras hidrolisadas, solução concentrada de tampão acetato para fase móvel e a mistura de padrões dos 17 aminoácidos (alanina, arginina, ácido aspártico, cistina, ácido glutâmico, glicina, histidina, isoleucina, leucina, lisina, metionina, fenilalanina, prolina, serina, treonina, tirosina e valina).

O preparo do reagente de derivatização (6-aminoquinolil-N-hidroxissuccinimidil carbamato - AQC) será de acordo com as instruções do fabricante. No vial contendo o extrato seco serão adicionados 20 µL do diluente de amostra (HCl 20mM) agitando vigorosamente em vórtex durante 15 segundos. Posteriormente será adicionado 60 µL de tampão borato e o vial será novamente agitado em vórtex durante 15 segundos. Por fim, serão adicionados 20 µL do derivatizante e a mistura será agitada imediatamente em vórtex durante 10 segundos. O vial será deixado em repouso durante 1,0 minuto para o término da reação. Posteriormente

será transferido para banho-maria a $55 \pm 1^\circ \text{C}$ por 10 minutos. A solução assim obtida será levada para análise cromatográfica. Alíquotas de 1 μL serão utilizadas para injeção direta no equipamento. Cada amostra terá três repetições de análise

A separação e quantificação dos 17 aminoácidos serão realizadas em cromatógrafo líquido de ultra performance (UPLC) Waters Acquity série 1100, com injetor automático de amostras. Será utilizado uma coluna de fase reversa do tipo C18, 1,8 μm (diâmetro interno de 2,1 mm (i.d.) $\times$ 100 mm. Para a separação será adotado o sistema de gradiente linear com quatro fases móveis, tendo como fases móvel: A (100% AccQTag Ultra eluente A concentrado), B (90:10 Água: AccQTag Ultra eluente B), C (100% água MilliQ), D (100% AccQ•Tag Ultra eluent B). A vazão da fase móvel será de 0,7 mL min^{-1} e a temperatura da coluna durante a corrida será de 49°C . A detecção dos aminoácidos será realizada utilizando detector de fluorescência, ajustado para o comprimento de onda de 266 a 473 nm (garzaulloo et al., 1986). A identidade qualitativa e quantitativa do pico será confirmada comparando os tempos de retenção e os espectros de UV de compostos individuais e pelo método de adição padrão.

2.7. Análise de cromatografia líquida para quantificação de flavonoides

Para as análises as amostras vegetais serão secas e posteriormente moídas. Para a extração das isoflavonas, 50 mg das amostras serão adicionadas em eppendorf de 2 mL, no qual será adicionado 1,5 mL de metanol 70% contendo ácido acético (0,1%). A mistura será agitada brevemente e depois incubado por 2 horas em ultrassom. Posteriormente, as amostras serão centrifugadas a 3.000 rpm por 20 min e o sobrenadante obtido será filtrado por meio de uma seringa com um filtro de 0,2 μm e transferidos para vials de 1,5 mL antes da injeção em um sistema de cromatografia líquida de ultra performance (UPLC). Alíquotas de 10 μL serão utilizadas para injeção direta no equipamento. Cada amostra terá três repetições de análise (Carrão-panizzi et al., 2002).

A separação e quantificação das isoflavonas será realizadas em cromatógrafo líquido no sistema UPLC Waters Acquity série 1100, com injetor automático de amostras. Será utilizado uma coluna de fase reversa do tipo HSS C18, 1,8 μm (diâmetro interno de 2,1 mm (i.d.) $\times$ 100 mm) com uma pré-coluna Acquity HSS C18, 1,8 μm (2,1mm i.d. $\times$ 5 mm). Para a separação das isoflavonas, será o sistema de gradiente linear binário, tendo como fases móvel: água Milli-Q e ácido acético 0,1% como solvente A e acetonitrila e ácido acético 0,1% como solvente B. O gradiente inicial será de 99% para o solvente A e 1,0% para o solvente B de 0 a 9 minutos, 41,2% A e 58,8% B de 9 a 9,1 minutos, 100% B de 9,1 a 11

minutos e retornando a 99% A e 1% B aos 11 minutos e permanecendo assim até 15 minutos, que foi o tempo de corrida para cada amostra (Carrão-panizzi et al., 2002). A vazão da fase móvel será de 0,289 mL min⁻¹ e a temperatura da coluna durante a corrida será de 30 °C.

A detecção das isoflavonas será realizada utilizando o detector de arranjo de foto diodo da marca Waters, ajustado para o comprimento de onda igual a 254 nm. Para a detecção das isoflavonas, serão utilizados padrões adquiridos comercialmente de daidzeína, daidzin, genisteína e genistina, solubilizados em metanol 70%, nas seguintes concentrações: 0,000125, 0,0002, 0,0005, 0,001, 0,01, 0,02 mg mL⁻¹. A identidade qualitativa e quantitativa do pico será confirmada comparando os tempos de retenção e os espectros de UV de compostos individuais pelo método de adição padrão.

2.8. Análise Estatística

Os dados foram submetidos a análise de variância e as médias comparadas pelo de teste Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade, no caso de efeitos significativos do teste F ($p \leq 0,05$), utilizando o software estatístico Sisvar versão 5.6 (Ferreira et al., 2019).

3.0 RESULTADOS

Para os flavonoides, o tratamento com metade da dose de nicotinamida (N50+H) elevou em 5,3 vezes sua concentração, em relação ao tratamento somente com herbicidas para o diadzein. Para o diadzin, o tratamento composto pela dose completa de tiamina (100T+H) se sobressaiu dos demais tratamentos, obtendo um ganho de 5 vezes, em relação aos demais tratamentos. Para a genisteína e genistin a junção da nicotinamida e tiamina na dose de 100% (100N100T+H) obteve o melhor desempenho com 10% e 17,07%, respectivamente, entre os demais tratamentos. Para o total de flavonoides o tratamento com a dose completa de nicotinamida (100N+H) alcançou um ganho de 2,5 vezes entre o tratamento com somente herbicidas.

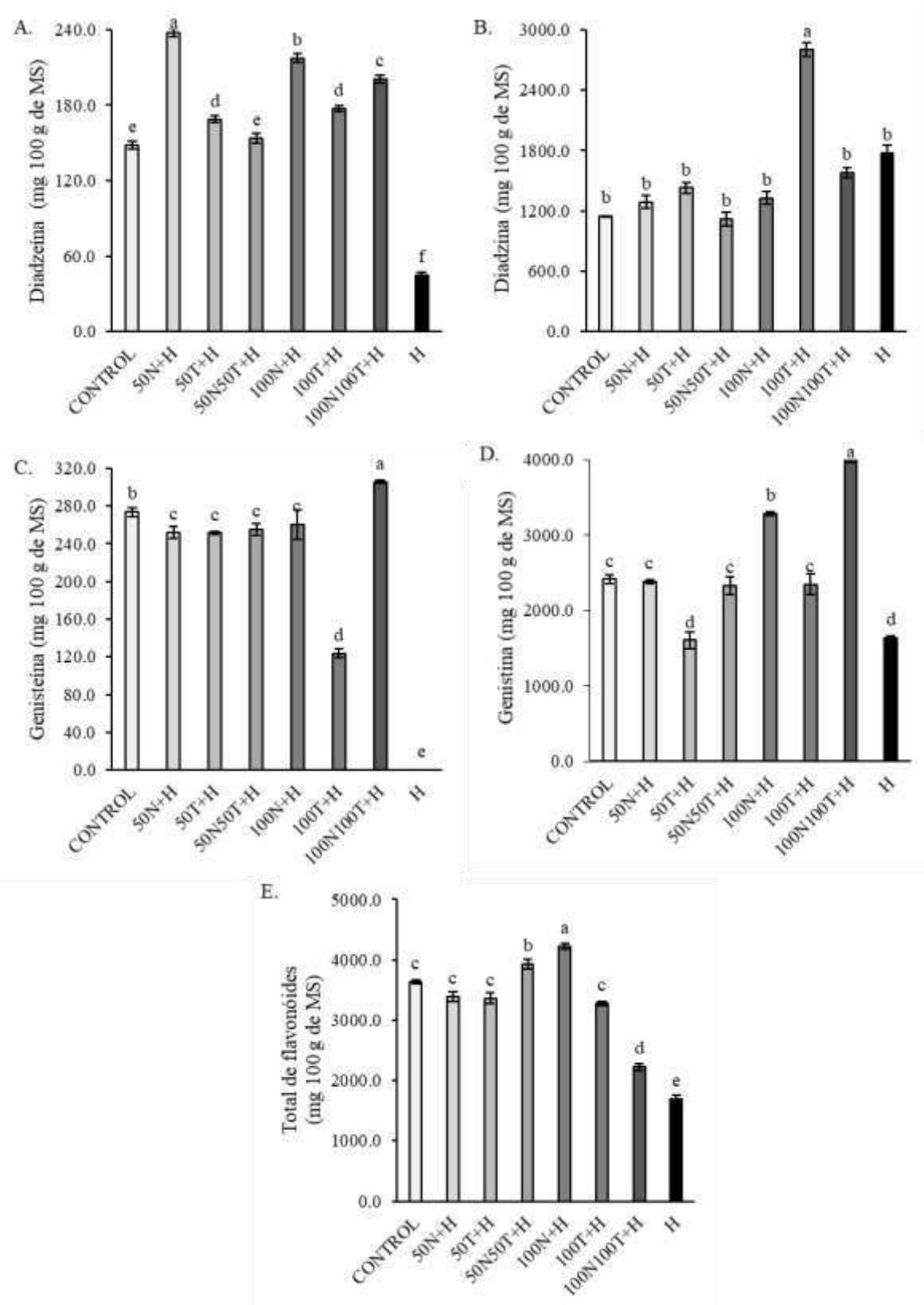


Figura 2. Diadzeína (A), diadzina (B), genisteína (C), genistina (D) e total de flavonóides (E), de plantas de soja tratadas com soluções vitamínicas e herbicidas. Letras diferentes sobre as barras indicam diferença significativa pelo teste de Skott-Knott com 5% de probabilidade ($p \leq 0,05$). Barras

de erro representam desvio padrão ($n = 4$). Control: testemunha; 50N+H: 22,5 g nicotinamida ha^{-1} + herbicidas; 50T+H: 7,5 g tiamina ha^{-1} + herbicidas; 50N50T+H: 22,5 g nicotinamida ha^{-1} + 7,5 g tiamina ha^{-1} + herbicidas L^{-1} ; 100N+H: 45 g nicotinamida ha^{-1} + herbicidas; 100T+H: 15 g tiamina ha^{-1} + herbicidas; 100N100T+ H: 45 g nicotinamida ha^{-1} + 15 g tiamina ha^{-1} + herbicidas; H: herbicidas.

Quando se utilizou a dose de 50% de nicotinamida com a junção de 50% de tiaminas promoveu um ganho de 16,30%, em relação ao tratamento com herbicidas. Para o ácido aspártico o tratamento com a metade da dose de tiamina (50T+H) alcançou 2,45 vezes de ganho, em relação ao tratamento com herbicidas.

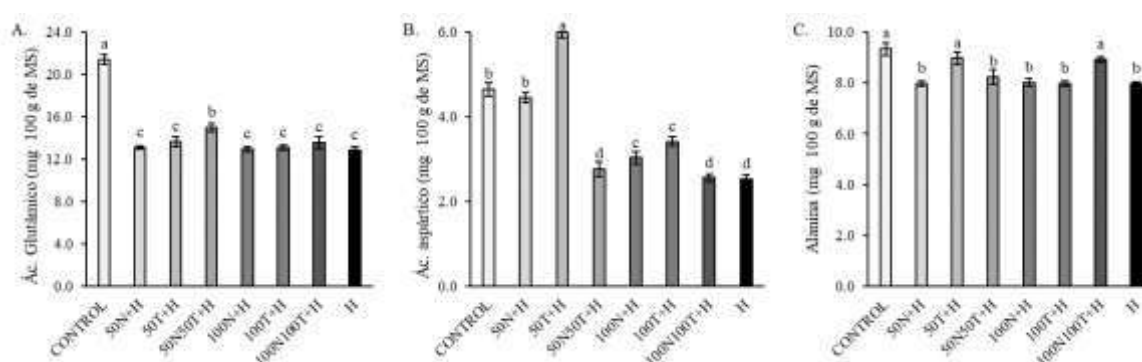


Figura 3. Ácido glutâmico (A), ácido aspártico (B) e alanina (C), de plantas de soja tratadas com soluções vitamínicas e herbicidas. Letras diferentes sobre as barras indicam diferença significativa pelo teste de Skott-Knott com 5% de probabilidade ($p \leq 0,05$). Barras de erro representam desvio padrão ($n = 4$). Control: testemunha; 50N+H: 22,5 g nicotinamida ha^{-1} + herbicidas; 50T+H: 7,5 g tiamina ha^{-1} + herbicidas; 50N50T+H: 22,5 g nicotinamida ha^{-1} + 7,5 g tiamina ha^{-1} + herbicidas L^{-1} ; 100N+H: 45 g nicotinamida ha^{-1} + herbicidas; 100T+H: 15 g tiamina ha^{-1} + herbicidas; 100N100T+ H: 45 g nicotinamida ha^{-1} + 15 g tiamina ha^{-1} + herbicidas; H: herbicidas.

A dose de 100% de nicotinamida com a junção da dose de 100% de tiamina promoveu ganho de 20,87%. Para serina, o tratamento na dose completa de nicotinamida (100N+H) obteve um ganho de 4,6 vezes entre o tratamento somente com herbicidas, para glicina o tratamento da metade da dose de tiamina (50N+H), alcançou um ganho de 27,62% entre o tratamento somente com herbicidas.

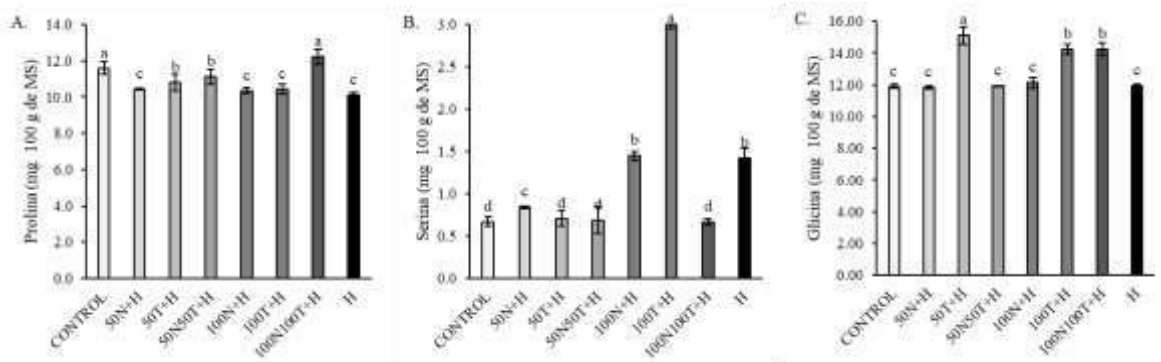


Figura 4. Prolina (A), serina (B) e glicina (C), de plantas de soja tratadas com soluções vitamínicas e herbicidas. Letras diferentes sobre as barras indicam diferença significativa pelo teste de Skott-Knott com 5% de probabilidade ($p \leq 0,05$). Barras de erro representam desvio padrão ($n = 4$). Control: testemunha; 50N+H: 22,5 g nicotinamida ha^{-1} + herbicidas; 50T+H: 7,5 g tiamina ha^{-1} + herbicidas; 50N50T+H: 22,5 g nicotinamida ha^{-1} + 7,5 g tiamina ha^{-1} + herbicidas L^{-1} ; 100N+H: 45 g nicotinamida ha^{-1} + herbicidas; 100T+H: 15 g tiamina ha^{-1} + herbicidas; 100N100T+H: 45 g nicotinamida ha^{-1} + 15 g tiamina ha^{-1} + herbicidas; H: herbicidas.

Para a arginina a dose de 50% de nicotinamida promoveu ganhos de 22,04% em relação ao tratamento com herbicidas. Para a treonina as vitaminas influenciaram a maioria dos tratamentos, com excessão a dose de 50% de tiamina e 50% de nicotinamida. Para o total de aminoácidos a dose de 50% de tiamina apresentou o melhor desempenho de 21,02%, em relação ao herbicidas.

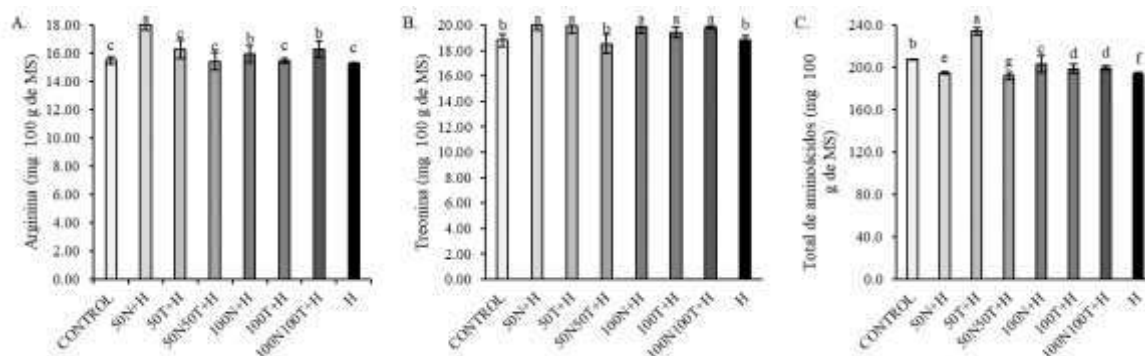


Figura 5. Arginina (A), treonina (B) e total de aminoácidos (C), de plantas de soja tratadas com soluções vitamínicas e herbicidas. Letras diferentes sobre as barras indicam diferença significativa pelo teste de Skott-Knott com 5% de probabilidade ($p \leq 0,05$). Barras de erro representam desvio padrão ($n = 4$). Control: testemunha; 50N+H: 22,5 g nicotinamida ha^{-1} + herbicidas; 50T+H: 7,5 g tiamina ha^{-1} + herbicidas; 50N50T+H: 22,5 g nicotinamida ha^{-1} + 7,5 g tiamina ha^{-1} + herbicidas L^{-1} ; 100N+H: 45 g nicotinamida ha^{-1} + herbicidas; 100T+H: 15 g tiamina ha^{-1} + herbicidas; 100N100T+H: 45 g nicotinamida ha^{-1} + 15 g tiamina ha^{-1} + herbicidas; H: herbicidas.

ha⁻¹ + 15 g tiamina ha⁻¹ + herbicidas; H: herbicidas.

4. DISCUSSÃO

4.1 Flavonoides

O uso de vitaminas proporcionou aumento dos valores dos flavonoides nas folhas de soja (Figura 2). Os flavonoides geralmente se acumulam no vacúolo das células vegetais na forma de glicosídeos, constituindo a classe das isoflavonas, principais moléculas que ocorrem nas leguminosas, especialmente na cultura da soja (Ku et al., 2020). São compostos que resultam do metabolismo secundário das plantas e desempenham um papel importante no metabolismo antioxidante e de defesa das plantas (Hernández-Rodríguez et al., 2019).

A enzima-chave para a biossíntese de flavonoides e isoflavonoides é a chalcona sintase (CHS), que é uma Policetide sintase tipo III que catalisa a conjugação de três unidades de acetato de malonil-CoA para a molécula iniciadora ap-cumaroil-CoA produzida pela via geral dos fenilpropanoides (Austin et al., 2003). Os isoflavonoides são uma classe de compostos fenólicos encontrados principalmente em leguminosas, como a daidzeína e genisteína, e estão envolvidos principalmente na adaptação ao ambiente, tanto como compostos defensivos quanto como moléculas de sinalização em interações simbióticas (García-Calderón et al., 2020; Kumar et al., 2020).

A presença dinâmica desses isoflavonoides influencia diretamente na resistência das plantas a fungos e estresses ambientais, moldando o crescimento e o desenvolvimento das plantas por meio da modulação complexa do transporte de auxina in vivo (Gao et al., 2021; Zhang et al., 2022).

Quando as plantas são expostas a sinais induzidos por estresse, como, danos fitotóxicos causados por herbicidas, elas utilizam isoflavonoides armazenados para sintetizar fitoalexina para aumentar a sua resistência. Os flavonoides previnem danos oxidativos agindo como antioxidantes (Saini et al., 2024). A genisteína e a daidzeína atuam como agentes antimicrobianos de amplo espectro, inibindo o crescimento e a reprodução de bactérias e fungos, aumentando assim a defesa das plantas contra patógenos (Dixon e Ferreira, 2002; Araya-Cloutier et al., 2017), diante dos resultados desse estudo, além de atuarem como agente antimicrobianos, com o uso das vitaminas a produção de diadzeína e genisteína aumentou significativamente reduzindo os efeitos fitotóxicos dos herbicidas nas plantas de soja (Figura 2A, 2B).

A daidzina é a forma glicosídica da daidzeína, que é mais solúvel em água e, portanto, mais adequada para armazenamento em vacúolos de células vegetais, além de ser mais estável e resistente à degradação enzimática, a produção aumentou quando utilizado tiamina (Figura 2B) (Ku et al., 2020). Além da proteção contra agentes antimicrobianos e resistência à degradação enzimática, as classes de flavonoides desempenham papel protetor contra a luz ultravioleta, defendendo contra estresses abióticos e regulando o movimento de auxinas nas plantas (Sandoval-Yañez et al., 2018). A capacidade antioxidante dos flavonoides está relacionada à sua estrutura estabilizada, permitindo que atuem sobre as espécies reativas de oxigênio, protegendo as células vegetais contra eventos que danificam seu metabolismo (Jabbari et al., 2016).

Nesse trabalho foi possível observar altos teores de flavonoides (Figura 2). A ocorrência de maiores níveis de genisteína indica que a aplicação das soluções vitamínicas tem um alto potencial intrínseco para induzir a eliminação de espécies reativas de oxigênio (ERO) quando as plantas de soja são expostas a condições adversas (Shen et al., 2022). A ação antioxidante de genisteína se deve aos numerosos grupos hidroxila em suas moléculas, eliminando as espécies reativas de oxigênio e inibindo as enzimas que geram essas espécies reativas (Nagarajan et al., 2020).

A aplicação de herbicidas leva ao estresse celular e está associada a mudanças na concentração dos compostos fenólicos nas plantas (Kumar et al., 2024). No tratamento somente herbicidas, a genisteína possuiu um declínio acentuado (Figura 2C), isso pode estar relacionado à interferência dos herbicidas nas vias metabólicas responsáveis pela biossíntese de flavonoides, como na via fenilpropanoide que é crucial para a síntese de genisteína (Kikuta et al., 2020; Gawlik-Dziki et al., 2023).

Estudos apresentaram que o tratamento com herbicidas pode mudar o foco metabólico para a produção de formas glicosiladas de flavonoides em vez de suas agliconas, reduzindo potencialmente as formas bioativas disponíveis na planta (Kikuta et al., 2020; Gawlik-Dziki et al., 2023). A exposição prolongada a herbicidas pode levar à exaustão metabólica e à síntese reduzida de compostos protetores como a genisteína (Kikuta et al., 2020; Pereira et al., 2024).

Daidzeína é a mais dominante de isoflavona, que é secretada ao longo do ciclo de vida da planta em maiores quantidades (Toyofuku et al., 2021) relataram que na soja cultivada em condições de campo, a quantidade de secreção de daidzeína também é maior

nos estágios vegetativos iniciais do que nas fases reprodutivas, mas a quantidade é aumentada até 10.000 vezes. A nicotinamida é uma substância bioestimulante constituinte das coenzimas NADH e NADPH que participam de muitas reações enzimáticas de oxidação-redução nas células (Sadak et al., 2010) e é considerada essencial para participar da metabolização de carboidratos, gorduras e proteínas envolvidas na fotossíntese e na respiração celular (Robinson et al., 1973; Kirkland et al., 2018).

O NADPH é um cofator vital na biossíntese de flavonoides, fornecendo o poder redutor necessário para várias reações enzimáticas, aumentar a disponibilidade de NADPH pode aumentar significativamente a produção de flavonoides em plantas (Figura 2). Embora NAD também possa servir como um redutor em alguns casos, NADPH é geralmente preferido devido à sua maior eficiência nessas vias biossintéticas (Chen et al., 2019).

A ocorrência de maiores níveis de genisteína indica que a aplicação das vitaminas tem um alto potencial intrínseco para induzir a eliminação de espécies reativas de oxigênio (ERO) quando as sementes são expostas a condições que promovem seu desenvolvimento, como o estresse abiótico que ativa a respiração celular (Shen et al., 2022). Sua ação antioxidante se deve aos numerosos grupos hidroxila em suas moléculas, eliminando radicais livres e inibindo enzimas que geram radicais livres (Nagarajan et al., 2020).

4.2 Aminoácidos

Os efeitos da aplicação exógena de vitaminas nas plantas de soja pode ter refletido na resposta dos aminoácidos (Fig. 3, 4 e 5). Os aminoácidos servem como o principal meio de transporte de nitrogênio orgânico nas plantas, desempenhando um papel essencial no crescimento e desenvolvimento vegetal (Dong et al., 2024).

Para se adaptar às mudanças ambientais, as plantas têm mecanismos complexos em seus corpos para a absorção, síntese, reciclagem, reutilização e transporte de aminoácidos para cada órgão (Tegeder e Masclaux-Daubresse, 2018). Além da síntese de proteínas, o metabolismo de aminoácidos também está intimamente ligado ao metabolismo de energia e carboidratos, ao orçamento de carbono-nitrogênio, ao metabolismo hormonal e secundário, às respostas ao estresse (Yang et al., 2020).

Os herbicidas interferem diretamente no crescimento, desenvolvimento e o metabolismo das plantas, expondo-as a condições de estresse agudo que, em alguns casos, levam à morte das plantas (Dayan et al., 2019). Muitos herbicidas induzem a produção

de espécies reativas de oxigênio em plantas (Dmitrieva et al., 2024). No estudo foi utilizado herbicidas do grupo 12 que interferem na biossíntese de carotenoides por meio da inibição da fitoeno dessaturase (PDS), isso leva a um aumento imediato da produção de $^1\text{O}_2$, pois os carotenoides são os principais supressores de $^1\text{O}_2$. Além disso, afeta a biossíntese do ácido abscísico fitohormônio relacionado ao estresse, que por si só pode induzir a formação de ERO e cascatas de sinalização de espécie reativo de oxigênio. Assim, os herbicidas desse grupo têm um efeito bastante complexo na produção de espécie reativo de oxigênio (Voigt et al., 2010; Park et al., 2021).

Os herbicidas do grupo 14 inibem a protoporfirinogênio IX oxidase (PPO), levando ao aumento dos níveis de precursores fotodinamicamente ativos de heme e clorofila e, portanto, dos níveis de $^1\text{O}_2$ (Traxler et al., 2023). A clorofila é o principal pigmento fotossintético das plantas verdes, pode ser classificada em cinco tipos distintos, incluindo clorofila a e b (Klabale et al., 2015; Ali et al., 2021). Quando aplicado os herbicidas, ocorre o estresse oxidativo o que interfere diretamente na produção de aminoácidos e no desenvolvimento das plantas de soja (Figura 2B).

Glutamato, glutamina, prolina e arginina pertencem à família do glutamato, o qual tem um papel central no metabolismo dos aminoácidos, estando diretamente envolvido tanto na assimilação da amônia quanto na transferência para todos os outros aminoácidos (Forde et al., 2007). Além disso, o ácido glutâmico é precursor da clorofila, utilizando as vitaminas em conjunto houve um aumento desse aminoácido (Figura 3A), demonstrando a capacidade das vitaminas em auxiliar a produção desses aminoácidos e recuperar os efeitos deletérios dos herbicidas (Uchiyama et al., 2024). A nicotinamida pode ser sintetizada a partir do aminoácido triptofano, ligando sua disponibilidade diretamente aos níveis de aminoácidos. Níveis adequados de nicotinamida são necessários para o metabolismo adequado do triptofano em NAD (nicotinamida adenina dinucleotídeo), uma coenzima essencial no metabolismo celular (Hrubša et al., 2022) e na forma reduzida do fosfato de dinucleotídeo de nicotinamida adenina (NADP, ou coenzima 2).

Na via do aspartato (Figura 2B), o mononucleotídeo de nicotinato (NaMN) é formado a partir de l - aspartato por meio da catálise da aspartato oxidase (AOX), quinolinato sintase (QS) e quinolinato fosforibosiltransferase (QPT) (Roje, 2007). O NaMN é convertido primeiro em ácido nicotínico adenina dinucleotídeo, depois em nicotinamida adenina dinucleotídeo (NAD) e, finalmente, degradado em vitamina B3 por várias enzimas

(Gerdes et al., 2012).

A via da família do aspartato leva a quatro aminoácidos essenciais principais, lisina, metionina, treonina e isoleucina, mas também está fortemente associada à homoserina, glutamato, glicina e prolina (Yang et al., 2018). A regulação do metabolismo de um determinado aminoácido afeta o nível de outros aminoácidos, devido principalmente à biossíntese e catabolismo de aminoácidos derivados do mesmo tronco metabólico ou intimamente relacionados a outras vias metabólicas, atuando como substrato sintético ou intermediário (Long et al., 2013; Song et al., 2013).

Entre os metabólitos vegetais, os metabólitos de treonina têm um papel significativo nas defesas químicas contra estresses abióticos (Nam et al., 2015). Além disso, os metabólitos de treonina estão envolvidos no crescimento e desenvolvimento das plantas e na divisão celular, e regulam os fitohormônios (Nam et al., 2015; Muthuramalingam et al., 2018). As vitaminas proporcionaram ganhos para esses aminoácidos mesmo as plantas estando com injúrias de herbicidas (Figura 5A).

A tiamina serve como um cofator em múltiplas etapas enzimáticas cruciais no metabolismo do carbono, incluindo aquelas catalisadas pela piruvato desidrogenase, α -ceto-glutarato desidrogenase e transcetolase (Goyer, 2010). É necessária na glicólise, no ciclo do ácido tricarboxílico, no metabolismo de nucleotídeos e na síntese de aminoácidos de cadeia ramificada (Adeva-Andany et al., 2017). Ao fazer isso, a vitamina B1, na forma de TPP, é necessária na glicólise, no ciclo do ácido tricarboxílico, no metabolismo de nucleotídeos e na síntese de aminoácidos de cadeia ramificada (Adeva-Andany et al., 2017).

A produção máxima de osmoprotetores, como a prolina, protege as plantas sob condições de estresse, regulando positivamente o metabolismo enzimático, a estabilidade da membrana e a desintoxicação de espécies reativas de oxigênio sob escassez de água (Jabeen et al., 2022), como observado nesse experimento, os tratamentos compostos pelas vitaminas proporcionaram maiores teores de prolina (Figura 3A). Em geral, o alto acúmulo de prolina está associado à tolerância aos estresses, como por fitotoxicidade de herbicidas (Luo et al., 2024). Um aumento na prolina também é induzido pelo glutamato da via da sacaropina e em resposta ao estresse osmótico e salino (Batista-Silva et al., 2019). Quando tecidos ou células estão sob estresse osmótico, a α -aminoadípica semialdeído desidrogenase (AASADH), a terceira enzima na via da sacaropina, é significativamente regulada positivamente, sugerindo que a AASADH também está relacionada à resposta ao estresse osmótico (Brocker et al., 2010). Além disso, a prolina desempenha múltiplas funções em outros estresses bióticos e

abióticos, transdução de sinal, expressão gênica, regulação de ERO, ajuste redox e desenvolvimento de plantas (Trovato et al., 2019).

A alanina é sintetizada a partir do ácido glutâmico, e sua transaminação com oxoglutarato produz glutamato e piruvato, uma reação reversível, concedendo a este aminoácido uma função dupla entre o metabolismo do carbono e do nitrogênio (Kendziorek et al., 2012). Por fim, este aminoácido está ligado à síntese de clorofilas e à atividade fotossintética (Sánchez-Pale, 2017) (Figura 3).

O aminoácido arginina (Figura 5A) sintetizam poliaminas e estão envolvidas nas respostas das plantas ao estresse. Além disso, a arginina constitui uma alta porcentagem do pool de aminoácidos em proteínas de armazenamento de coníferas, enquanto o perfil do transcriptoma e do metaboloma também revelou genes e metabólitos significativos envolvidos no metabolismo da arginina durante a embriogênese tardia (Businge et al., 2012; Llebrés et al., 2018).

O ácido aspártico é obtido a partir de uma reação de transaminação entre glutamato e oxaloacetato nas plantas, e é metabolizado para produzir os aminoácidos lisina, treonina, metionina e isoleucina, em uma série de reações conhecidas como via metabólica do ácido aspártico (Alfosea-Simón et al., 2021).

Glicina e serina são todos aminoácidos da família das serinas, a serina é derivada do intermediário glicolítico 3-fosfoglicerato (Ros et al., 2014), que por sua vez pode ser convertido em glicina pela serina hidroximetil transferase (Dolce et al., 2001). A tiamina promoveu alta produção desses aminoácidos (Figura 4B, 4C) isso ocorreu, possivelmente, a tiamina ativar genes responsivos ao estresse e a transdução do sinal de cálcio (Li et al., 2022).

A tiamina atua como molécula sinalizadora sob estresse biótico e abiótico e modula o metabolismo da planta de acordo com seu ambiente (Goyer, 2010). É precursora de fitohormônios que, em pequena quantidade, retêm um efeito benéfico no crescimento das plantas, no desenvolvimento que pode afetar as vias metabólicas energéticas e a produção de antioxidantes (Dawood et al., 2016; Mostafa et al., 2015) conforme apresentado neste estudo (Figura 5C). Então, a maioria dos processos fisiológicos essenciais, como metabólitos secundários são dependentes da disponibilidade de vitaminas (Kausar et al., 2023).

5. CONCLUSÃO

A aplicação exógena das vitaminas, tiamina e nicotinamida foi capaz de amenizar o efeito fitotóxico da aplicação de herbicidas pós-emergente na cultura da soja, com destaque quando se utiliza a nicotinamida, na dose de 22,5 g ha⁻¹, e a tiamina, na dose de 7,5 g ha⁻¹ a qual incrementou na maioria dos flavonoides e aminoácidos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Chen, Q., Wang, B., Ding, H., Zhang, J., & Li, S. (2019). Review: The role of NADP-malic enzyme in plants under stress. *Plant science: an international journal of experimental plant biology*, 281, 206-212. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2019.01.010>.

Colinas, M., & Fitzpatrick, T. B. (2015). Natures balancing act: examining biosynthesis de novo, recycling and processing damaged vitamin B metabolites. **Current Opinion in Plant Biology**, 25, 98-106.

Dawood, M., El-Metwally, I., & Abdelhamid, M. (2016). Physiological response of lupine and associated weeds grown at salt-affected soil to α -tocopherol and hoeing treatments. **Gesunde Pflanzen**, 68(2).

DMITRIEVA, Valeria A.; TYUTEREVA, Elena V.; VOITSEKHOVSKAJA, Olga V. What can reactive oxygen species (ROS) tell us about the action mechanism of herbicides and other phytotoxins?. **Free Radical Biology and Medicine**, 2024.

DONG, Kui et al. Improvement of plant quality by amino acid transporters: a comprehensive review. **Plant Physiology and Biochemistry**, p. 109084, 2024.

Du, Q., Wang, H., & Xie, J. (2011). Thiamin (vitamin B1) biosynthesis and regulation: a rich source of antimicrobial drug targets?. **International journal of biological sciences**, 7(1), 41.

GAWĘDA, Dorota et al. The Effect of Herbicides and Biostimulant Application on the Seed Yield and Seed Quality of Soybean (*Glycine max* (L.) Merr.). **Agronomy**, v. 14, n. 9, p. 2174, 2024.

Goyer, A. (2010). Thiamine in plants: aspects of its metabolism and functions. **Phytochemistry**, 71(14-15), 1615-1624.

HERNÁNDEZ-RODRÍGUEZ, Patrícia; BAQUERO, Ludy Pabón; LARROTA, Harold Rodríguez. Flavonoides: Potenciais agentes terapêuticos pela sua capacidade antioxidante. In: **Compostos Bioativos** . Publicação Woodhead, 2019. p. 265-288.

HYLANDER, Samuel et al. Thiamin (vitamin B1, thiamine) transfer in the aquatic food web from lower to higher trophic levels. **PLoS One**, v. 19, n. 12, p. e0308844, 2024.

KAUSAR, Abida et al. Alleviation of drought stress through foliar application of thiamine in two varieties of pea (*Pisum sativum* L.). **Plant Signaling & Behavior**, v. 18, n. 1, p. 2186045, 2023.

KIM, Min-Ah; KIM, Mi-Ja. Perfis de isoflavona e propriedades antioxidantes em diferentes partes do broto de soja. **Journal of food science** , v. 85, n. 3, p. 689-695, 2020.

KU, Yee-Shan et al. Compreendendo a composição, biossíntese, acumulação e transporte de flavonoides em culturas para a promoção de culturas como fontes saudáveis de flavonoides para consumo humano. **Nutrients** , v. 12, n. 6, p. 1717, 2020.

Li, W., Mi, X., Jin, X., Zhang, D., Zhu, G., Shang, X., ... & Guo, W. (2022). Thiamine functions as a key activator for modulating plant health and broad-spectrum tolerance in cotton. **The Plant Journal**, 111(2), 374-390.

LI, Weixi et al. Thiamine functions as a key activator for modulating plant health and broad-spectrum tolerance in cotton. *The Plant Journal*, v. 111, n. 2, p. 374-390, 2022.

Mostafa, M. R., Mervat, S. S., Safaa, R. E. L., Ebtihal, M. A. E., & Magdi, T. A. (2015). Exogenous α -tocopherol has a beneficial effect on *Glycine max* (L.) plants irrigated with diluted sea water. **The Journal of Horticultural Science and Biotechnology**, 90(2), 195-202.

Muthuramalingam, P., Krishnan, SR, Pandian, S. *et al.* Análise global de genes do metabolismo da treonina revelam os principais participantes do arroz para melhorar a tolerância ao estresse abiótico. **Sci Rep** 8, 9270 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-27703-8>

NAGARAJAN, Subhalakshmi et al. Atividade antioxidante de polímeros sintéticos de compostos fenólicos. **Polímeros** , v. 12, n. 8, p. 1646, 2020.

NAM, Myung Hee et al. Perfil de metabólitos de germoplasma de arroz diverso e identificação de marcadores metabólicos conservados de raízes de arroz em resposta a estresse de salinidade leve de longo prazo. **International Journal of Molecular Sciences** , v. 16, n. 9, p. 21959-21974, 2015.

Park, J. H., & Jung, S. (2021). Alleviation of norflurazon-induced photobleaching by overexpression of Fe-chelatase in transgenic rice. *Journal of pesticide science*, 46(3), 258-266.

RIZWAN, Hafiz Muhammad et al. Comprehensive in silico characterization of soybean (*Glycine max* L.) isoflavone reductase genes and their expressions in response to spermidine and ultrasonication. **Plant Stress**, v. 11, p. 100392, 2024.

ROJAS, Clemencia M. et al. Regulação do metabolismo primário da planta durante interações planta-patógeno e sua contribuição para a defesa da planta. **Frontiers in plant science** , v. 5, p. 17, 2014.

Roy A, Khan A, Ahmad I, Alghamdi S, Rajab BS, Babalghith AO, Alshahrani MY, Islam S, Islam MR. Flavonoids a Bioactive Compound from Medicinal Plants and Its Therapeutic Applications. **Biomed Res Int**. 2022 Jun 6;2022:5445291. doi: 10.1155/2022/5445291. PMID: 35707379; PMCID: PMC9192232.

SAINI, Nancy et al. Exploring phenolic compounds as natural stress alleviators in plants-a comprehensive review. **Physiological and Molecular Plant Pathology**, p. 102383, 2024.

Sandoval-Yañez, C., Mascayano, C. & Martínez-Araya, JI Uma avaliação teórica da capacidade antioxidante de flavonoides por meio de hiper-suavidade local. *Árabe. J. Chem.* 11 (4), 554–563. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2017.10.011> (2018).

SHEN, Nan et al. Flavonoides vegetais: Classificação, distribuição, biossíntese e atividade antioxidante. **Química de alimentos** , v. 383, p. 132531, 2022.

SMOLIK, Beata; SĘDZIK-WÓJCIKOWSKA, Maja. Examining Nicotinamide Application Methods in Alleviating Lead-Induced Stress in Spring Barley. **Agronomy**, v. 14, n. 6, p. 1314, 2024.

TRAXLER, Catherine et al. The nexus between reactive oxygen species and the mechanism of action of herbicides. **Journal of Biological Chemistry**, p. 105267, 2023.

UCHIYAMA, Nobu; ORIO, Michio. The Power of Photosynthesis: Exploring the Biological, Chemical, and Ecological Dimensions of Earth's Primary Energy Source. **Asian American Research Letters Journal**, v. 1, n. 3, 2024.

VENDRUSCOLO, Eduardo P. et al. Biostimulant potential of *Azospirillum brasilense* and nicotinamide for hydroponic pumpkin cultivation. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 28, n. 4, p. e278962, 2024. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v28n4e278962>.

VOIGT, Christian et al. In-depth analysis of the distinctive effects of norflurazon implies that tetrapyrrole biosynthesis, organellar gene expression and ABA cooperate in the GUN-type of plastid signalling. **Physiologia Plantarum**, v. 138, n. 4, p. 503-519, 2010.

WANG, Lijun; LI, Chaofeng; LUO, Keming. Biosynthesis and metabolic engineering of isoflavonoids in model plants and crops: A review. **Frontiers in Plant Science**, v. 15, p. 1384091, 2024.

YANG, Qilin; WANG, Guodong. Isoflavonoid metabolism in leguminous plants: an update and perspectives. **Frontiers in Plant Science**, v. 15, p. 1368870, 2024.

ZAKI, Faten SA et al. The impact of α -tocopherol and nicotinamide on performance of lupine plant grown under sandy soil conditions. **Egyptian Journal of Chemistry**, v. 65, n. 132, p. 1231-1240, 2022.