

**ÁCIDO INDOLBUTÍRICO NO ENRAIZAMENTO DE CLONES DE SOJA
PARA FINS DE MELHORAMENTO GENÉTICO**

por

CARLOS VINICIUS DA SILVA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Bioenergia e Grãos do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Bioenergia e Grão

Rio Verde – GO

Agosto – 2025

**ÁCIDO INDOLBUTÍRICO NO ENRAIZAMENTO DE CLONES DE SOJA
PARA FINS DE MELHORAMENTO GENÉTICO**

Por

CARLOS VINICIUS DA SILVA

Comitê de Orientação:

Prof. Dr. Aurélio Rubio Neto, IF Goiano – Campus Rio Verde

Rio Verde – GO

Agosto – 2025



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

Documentos 50/2025 - SREPG/CMPR/CPG-RV/DPGPI-RV/CMPRV/IFGOIANO

ÁCIDO INDOLBUTÍRICO NO ENRAIZAMENTO DE CLONES DE SOJA PARA FINS DE MELHORAMENTO
GENÉTICO

Autor: Carlos Vinicius da Silva
Orientador: Aurélio Rubio Neto

TITULAÇÃO: Mestre em Bioenergia e Grãos - Área de Concentração Agroenergia

APROVADA em 29 de agosto de 2025.

Assinado eletronicamente
Dr.^a Tallyta Nayara Silva
Avaliadora externa - BASF S.A

Assinado eletronicamente
Prof. Dr. Sihélio Júlio Silva Cruz
Avaliador interno - IF Goiano Campus
Iporá

Assinado eletronicamente
Prof. Dr. Aurélio Rubio Neto
Presidente da Banca - IF Goiano Campus Rio Verde

Documento assinado eletronicamente por:

- **Aurelio Rubio Neto, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 29/08/2025 15:24:48.
- **Sihelio Julio Silva Cruz, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 29/08/2025 15:26:21.
- **Tallyta Nayara Silva, Tallyta Nayara Silva - Professor Avaliador de Banca - Basf Sa (48539407010938)**, em 28/09/2025 23:26:14.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 28/08/2025. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 737806
Código de Autenticação: a9bada07fa



Rio Verde – GO

Agosto – 2025

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

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

IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

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

☐ Produto técnico e educacional - Tipo:

Nome completo do autor:

Carlos Vinicius da Silva

Matrícula:

2023202331540001

Título do trabalho:

ÁCIDO INDOLBUTÍRICO NO ENRAIZAMENTO DE CLONES DE SOJA PARA FINS DE MELHORAMENTO GENÉTICO

RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial: ☒ Não ☐ Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: 29/10/2025

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

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

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

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

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

Rio Verde - GO

29/10/2025

Local

Data

gov.br

Documento assinado digitalmente

CARLOS VINICIUS DA SILVA

Data: 30/10/2025 11:44:06-0300

Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Assinatura uu

is

gov.br

Documento assinado digitalmente

AURELIO RUBIO NETO

Data: 30/10/2025 11:55:16-0300

Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Ciente e de acordo:

Assinatura do(a) orientador(a)

Rio Verde – GO

Agosto – 2025

DECLARAÇÃO

ELIANE REGINA GIUNTA GUIMARÃES, e-mail: eregiunta@hotmail.com e eliane.giunta@gmail.com, celular 44 99854 8832 (WhatsApp), profissional da área de Letras Anglo-Portuguesas, declara que realizou a revisão linguística textual, gramatical e ortográfica em Língua Portuguesa e Língua Inglesa (apenas na tradução obrigatória do resumo geral = *Abstract*) na Dissertação de Mestrado do(a) pós-graduando(a) CARLOS VINICIUS DA SILVA, intitulada “ÁCIDO INDOLBUTÍRICO NO ENRAIZAMENTO DE CLONES DE SOJA PARA FINS DE MELHORAMENTO GENÉTICO” para o Programa de Pós-Graduação em Bioenergia e Grãos do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde.

Por ser verdade, data e firma a presente.

Rio verde, 17 de outubro de 2025.


Eliane Regina Giunta Guimarães.

Rio Verde – GO

Agosto – 2025

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus, fonte de força, sabedoria e inspiração, por ter guiado cada passo nesta jornada acadêmica. Dedico este trabalho à minha família, pelo suporte incondicional, e ao meu orientador, pelo estímulo, paciência e orientação ao longo desta etapa e a todos que acreditaram no meu potencial, mesmo nos momentos em que eu duvidei de mim mesmo.

Rio Verde – GO

Agosto – 2025

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder saúde, força e sabedoria durante toda essa caminhada acadêmica.

À minha esposa, pelo amor, companheirismo e paciência nos momentos de ausência e dedicação total a este trabalho. Sua presença foi essencial para que eu mantivesse o foco e a motivação.

Aos meus filhos, Maria Luísa e Leonardo, que mesmo tão pequenos ensinaram grandes lições sobre persistência, ternura e propósito. Vocês são a razão do meu esforço diário e o reflexo mais bonito do futuro que quero construir.

Aos meus pais, por todo apoio e pelos valores que me transmitiram desde a infância, que foram fundamentais para minha formação pessoal e profissional.

Agradeço também aos meus colegas de trabalho e aos gestores da BASF, empresa na qual tenho a honra de atuar. O apoio, a compreensão e o incentivo de todos foram fundamentais para que eu pudesse conciliar meus compromissos profissionais com a realização deste mestrado. Sou grato pela confiança depositada em mim e pela oportunidade de crescimento em um ambiente que valoriza o conhecimento e a inovação.

Ao meu orientador, por compartilhar conhecimento, experiências e apoio técnico ao longo desta jornada.

Aos amigos e colaboradores que, de maneira direta ou indireta, contribuíram para a realização deste trabalho, meu sincero muito obrigado.

SUMÁRIO

Página

RESUMO.....	1
ABSTRATCT.....	2
1. INTRODUÇÃO.....	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	7
3.1 Localização e preparo do ensaio.....	7
3.2 Instalação e delineamento experimental.....	8
3.3 Condução do ensaio.....	9
3.4 Tratamentos.....	9
3.5 Parâmetros avaliados.....	11
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	13
5. CONCLUSÕES.....	26
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	26

ÁCIDO INDOLBUTÍRICO NO ENRAIZAMENTO DE CLONES DE SOJA PARA FINS DE MELHORAMENTO GENÉTICO

por

CARLOS VINÍCIUS DA SILVA

Sob orientação do Professor Dr. Aurélio Rubio Neto, IF Goiano – Campus Rio Verde

RESUMO: A soja (*Glycine max* (L.) Merrill) é uma das principais culturas agrícolas do mundo, desempenhando papel estratégico na segurança alimentar e energética global. Em programas de melhoramento genético desta espécie, é comum baixo volume de material genético. Visando atender à crescente demanda por cultivares mais produtivos e adaptados, avaliou-se a aplicação do ácido indolbutírico (AIB) e da babosa (*Aloe vera* (L.) Burm. f.) no enraizamento de estacas de soja, como alternativa para a propagação vegetativa de genótipos elite em programas de melhoramento genético. Foram testadas concentrações de 0, 750, 1500 e 3000 mg L⁻¹ de AIB, com e sem babosa, utilizando o sistema de aeroponia como ambiente controlado para a indução de raízes. Os melhores tratamentos foram contrastados com o gel enraizador comercial. Avaliaram-se parâmetros morfofisiológicos ao longo do ciclo, incluindo comprimento de raízes, número de folhas, altura de plantas e rendimento de sementes. Os resultados demonstraram que a ausência ou doses baixas de AIB favoreceram o enraizamento e o desenvolvimento radicular sem comprometer o crescimento da parte aérea. Em contrapartida, doses elevadas inibiram o comprimento das estacas, indicando possível fitotoxicidade. O uso de babosa como aditivo não comprometeu a eficácia do enraizamento, configurando-se como alternativa viável. Conclui-se que a técnica de estaquia associada ao uso de AIB, especialmente em doses mínimas, representou estratégia eficaz para clonagem de plantas de soja, contribuindo para a superação de gargalos na multiplicação de materiais genéticos em fases críticas do melhoramento. Estes achados fornecem subsídios para a padronização de protocolos de propagação vegetativa na cultura da soja, com potencial para aplicações comerciais e científicas.

PALAVRAS-CHAVE: Propagação vegetativa; *Glycine max* (L.) Merrill; AIB; Aeroponia; Estaquia.

INDOLE-3-BUTYRIC ACID IN THE ROOTING OF SOYBEAN CLONES FOR BREEDING PURPOSES

By

CARLOS VINÍCIUS DA SILVA

Under the supervision of Professor Dr. Aurélio Rubio Neto, IF Goiano – Rio Verde Campus

ABSTRACT: Soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) is one of the main agricultural crops worldwide, playing a strategic role in global food and energy security. In breeding programs for this species, the availability of genetic material is often limited. To meet the growing demand for more productive and better-adapted cultivars, the indole-3-butyric acid (IBA) and aloe (*Aloe vera* (L.) Burm. f.) application was evaluated for rooting soybean cuttings as an alternative for vegetative propagation of elite genotypes in breeding programs. Concentrations of 0, 750, 1500, and 3000 mg L⁻¹ of IBA, with and without aloe, were tested using an aeroponic system as a controlled environment for root induction. The best treatments were compared with a commercial rooting gel. Morphophysiological parameters were evaluated throughout the growth cycle, including root length, number of leaves, plant height, and seed yield. Results showed that the absence or low doses of IBA favored rooting and root development without compromising shoot growth. In contrast, high doses inhibited cutting length, indicating possible phytotoxicity. The use of aloe as an additive did not impair rooting efficiency, proving to be a viable alternative. It is concluded that stem cutting combined with the IBA use, especially at moderate doses, is an effective strategy for cloning soybean plants, helping to overcome bottlenecks in the multiplication of genetic material during critical stages of breeding. These findings provide a basis for standardizing vegetative propagation protocols in soybean cultivation, with potential for both commercial and scientific applications.

KEYWORDS: Vegetative propagation; *Glycine max* (L.) Merrill; IBA; Aeroponics; Cutting.

1. INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max* (L.) Merrill, Fabaceae) é uma das culturas agrícolas mais relevantes no cenário mundial, desempenhando papel estratégico na alimentação humana, na formulação de rações animais e na produção de biocombustíveis. O Brasil figura entre os maiores produtores e exportadores globais, com produção estimada em 148,3 milhões de toneladas para 2024 (IBGE, 2024). Além de seu valor econômico, a soja apresenta elevado teor proteico e perfil lipídico de interesse nutricional, sendo central para a segurança alimentar e energética (Corbellini *et al.* 2024).

Apesar da importância socioeconômica, a produtividade da soja é frequentemente limitada por fatores bióticos e abióticos. Esses desafios têm motivado a busca por estratégias inovadoras de multiplicação de genótipos adaptados, com destaque para métodos que mantenham a fidelidade genética e acelerem o processo seletivo. Nesse contexto, a propagação vegetativa por estaquia tem se mostrado uma alternativa promissora, pois permite a multiplicação rápida de materiais genéticos de interesse em qualquer estágio do melhoramento (Garzón *et al.* 2023).

O sucesso da estaquia está fortemente condicionado por fatores fisiológicos e pelo uso de reguladores de crescimento. Entre eles, as auxinas desempenham papel essencial na indução da rizogênese. O ácido indolbutírico (AIB), em particular, destaca-se pela baixa toxicidade, elevada estabilidade e comprovada eficiência na formação de raízes adventícias. Pesquisas conduzidas por Lima *et al.* (2019) demonstraram que o AIB pode ser aplicado em diferentes espécies vegetais sem causar efeitos fitotóxicos, mesmo em concentrações consideradas eficazes para indução radicular. Além disso, trabalhos desenvolvidos em sistemas aeropônicos evidenciam que concentrações moderadas de AIB (a cerca de 0,2%) potencializam significativamente o número e a qualidade das raízes formadas (Lesmes-Vesga *et al.*, 2021).

Considerando a importância do AIB, diferentes formas de aplicação têm sido investigadas para potencializar seu efeito. Entre elas, destacam-se os géis comerciais formulados com AIB e extratos vegetais como o de babosa (*Aloe vera* (L.) Burm. f.), que podem funcionar como veículos para a auxina e, simultaneamente, fornecer compostos bioativos capazes de atuar sinergicamente no processo de enraizamento (Cai *et al.* 2023).

Apesar dos avanços, poucos estudos avaliam de forma sistemática a interação entre diferentes concentrações de AIB e formas de aplicação no enraizamento de estacas de soja, especialmente em sistemas de cultivo inovadores como a aeroponia. Este sistema, caracterizado pela suspensão das raízes no ar e irrigação por névoa nutritiva, oferece vantagens como alta oxigenação, controle preciso das variáveis ambientais e facilidade no acompanhamento do desenvolvimento radicular (Wootton-Beard, 2019; Onteng-Darko *et al.* 2017).

Diante dessa lacuna, este estudo teve como objetivo investigar o efeito de diferentes concentrações de AIB, aplicadas por imersão em solução com diferentes doses, gel comercial ou extrato de babosa, no enraizamento de estacas de soja em sistema de aeroponia. Buscou-se determinar a concentração e o método de aplicação mais eficientes para maximizar a taxa de enraizamento e o vigor radicular, contribuindo para o desenvolvimento de protocolos mais eficientes e economicamente viáveis para clonagem de soja em programas de melhoramento genético.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A cultura da Soja

A soja (*Glycine max*) é uma das principais commodities agrícolas do mundo, ocupando posição estratégica na produção de alimentos e insumos industriais pela ampla utilização na fabricação de óleos vegetais, rações e biocombustíveis (Kumari *et al.* 2025). No Brasil, a cultura apresenta elevada importância econômica e tecnológica, sendo cultivada em diversos ambientes, incluindo regiões de expansão como o Cerrado, em que a adaptação de genótipos a diferentes condições edafoclimáticas é um dos maiores desafios para os programas de melhoramento (Corbellini *et al.* 2024).

Apesar do expressivo avanço em produtividade e resistência a estresses, obtidos por meio de cultivares adaptados e manejo integrado, o processo de desenvolvimento de novas variedades permanece limitado pelo tempo de ciclo e, especialmente, pela escassez de sementes nas fases iniciais de seleção. Essa limitação restringe o número de cruzamentos, repetições e locais de teste, comprometendo a precisão da avaliação e a velocidade de lançamento de novos materiais (Rasheed *et al.* 2022).

Nesse contexto, estratégias que acelerem a multiplicação de genótipos promissores e permitam ampliar a base experimental tornam-se essenciais. Entre elas, destaca-se o uso

de métodos alternativos de propagação em ambiente controlado, que podem gerar lotes homogêneos de plantas a partir de indivíduos selecionados, garantindo a continuidade do processo seletivo mesmo diante de baixa disponibilidade de sementes (Tang *et al.* 2024).

2.2 Melhoria da Soja

O melhoramento genético da soja tem sido um dos principais motores do avanço tecnológico da agricultura brasileira nas últimas décadas. Graças a esse processo, foram desenvolvidos cultivares com maior potencial produtivo, resistência a doenças, além de adaptação a diferentes latitudes e tolerância a estresses abióticos como déficit hídrico e temperaturas elevadas (Silva 2018). Entretanto, como tem sido difícil expandir a agricultura para novas áreas, a saída é o aumento da produtividade do cultivo (Yang *et al.* 2020).

O Brasil destaca-se como um dos líderes mundiais em melhoramento genético da soja, tanto no setor público, por meio da EMBRAPA e instituições de ensino superior, quanto no setor privado, com empresas nacionais e multinacionais. Ainda assim, os programas de melhoramento enfrentam desafios importantes. Um dos principais entraves é o tempo necessário para o desenvolvimento de novos cultivares, que pode variar de 8 a 12 anos. Esse processo compreende várias etapas: geração de variabilidade genética, seleção precoce, avaliação em diferentes ambientes, testes de valor de cultivo e uso (VCU), e a multiplicação de sementes básicas e certificadas.

Outro ponto crítico é a escassez de semente nas fases precoces, que restringe o número de cruzamentos, repetições e ambientes testados, diminuindo a precisão da seleção. Em paralelo, a fenotipagem radicular permanece um desafio em solo, dado o alto custo e a baixa visibilidade do sistema radicular, podendo atrasar decisões sobre vigor, arquitetura e eficiência funcional das raízes. Plataformas controladas e métodos de alto rendimento (ex. aeroponia e hidroponia) surgem como alternativas para padronizar ambiente, expor o sistema radicular e aumentar a escala de avaliação sem dano às plantas (Cai *et al.* 2023).

Diante das limitações operacionais do pipeline (tempo de ciclo, escassez de semente e capacidade de fenotipagem), técnicas complementares têm sido adotadas para acelerar a multiplicação e a avaliação de linhagens. A propagação vegetativa por estaquia, embora pouco difundida em soja, é uma alternativa prática para clonar indivíduos elite nas fases iniciais, suprimindo rapidamente lotes uniformes para cruzamentos e ensaios sem perda de identidade genética (Chang *et al.* 2024). Embora a multiplicação clonal de híbridos F₁ via

estacas seja pouco relatada em estudos modernos, experimentos recentes têm demonstrado a viabilidade de multiplicar mudas de soja a partir de estacas de plântulas em ambientes hidropônicos. Hata & Futamura (2020) obtiveram sucesso ao produzir mudas por estacas inicializadas com inoculação de *Rhizobium* (taxas de enraizamento superiores a 90%, sobrevivência das mudas acima de 85%), evidenciando uma rota moderna para clonagem rápida e eficiente em fases iniciais do melhoramento.

No nível fisiológico, a associação da estaquia com auxinas, em especial o ácido indolbutírico, acelera a iniciação de primórdios radiculares e reduz o tempo até o enraizamento efetivo. Em tecidos de soja, respostas consistentes ao AIB foram demonstradas *in vitro*: concentrações baixas (0,1–0,5 mg L⁻¹) promoveram 100% de enraizamento em ~13 dias, com até 6 raízes/broto e comprimentos médios próximos de 8 cm, evidenciando a sensibilidade do material de soja ao regulador quando dose e ambiente são controlados (Begum *et al.* 2019). Se a dose de auxina passar do ideal pode intensificar a relação auxina e etileno, restringindo elongação e comprometendo o vigor, aspecto central para calibragem de protocolos em soja (Steffens & Rasmussen 2016).

A eficiência do ambiente de enraizamento também é determinante. Sistemas sem a presença de solo com alta oxigenação da zona radicular como exemplo a aeroponia, aumentam a uniformidade do enraizamento e permitem fenotipagem direta do sistema radicular sem dano, além de controle fino da solução nutritiva e menor risco de patógenos de solo. Um protocolo aeropônico modificado para leguminosas de semente pequena mostrou-se particularmente útil para fenotipar raízes e acompanhar nódulos em tempo real, com controle ambiental e acesso fácil às raízes (Cai *et al.* 2023). Em soja, sistemas aeropônicos têm se mostrado ferramentas eficazes para estudos com controle preciso do ambiente radicular. Mueller *et al.* (2002) demonstraram a utilidade para inoculação controlada de *Phytophthora sojae*, garantindo alta oxigenação e crescimento radicular uniforme. Mais recentemente, essas abordagens também vêm sendo usadas para amostragem não destrutiva de exsudatos e simulação de estresse hídrico, ampliando o potencial em avaliações ecofisiológicas e de melhoramento (Lin *et al.*, 2024).

Em síntese, a integração estaquia + AIB + aeroponia atende a três necessidades do pipeline, mitigar a limitação de sementes gerando lotes clonais homogêneos de linhagens alvo, padronizar o ambiente para calibrar dose/tempo de AIB com métricas objetivas (número de raízes, comprimento, volume, massa) e detectar precocemente efeitos supra-ótimos e elevar a qualidade da fenotipagem radicular (morfologia, nódulos, exsudação) com maior repetibilidade e menor custo amostral, acelerando a multiplicação e a seleção

de genótipos de soja em fases iniciais (Begum *et al.* 2019; Steffens & Rasmussen, 2016; Cai *et al.* 2023; Mueller *et al.* 2002).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização e preparo do ensaio

O ensaio foi conduzido de julho a dezembro de 2024, na Estação de pesquisa e melhoramento da BASF, em Trindade-GO, com as seguintes coordenadas geográficas: latitude 16°37'12.00", longitude 49°33'10.43". O ensaio foi conduzido em casa de vegetação com clima interno controlado, mantendo temperaturas médias de $32 \pm 5^{\circ}\text{C}$ durante o dia e $28 \pm 5^{\circ}\text{C}$ à noite, além de umidade relativa de $40 \pm 20\%$. Durante todo o período inicial, utilizou-se iluminação artificial contínua (24 h) para impedir a indução floral e manter as plantas em estágio vegetativo. Essa estratégia assegurou que, na fase de enraizamento das estacas, recursos fisiológicos fossem direcionados ao crescimento vegetativo e à rizogênese, evitando o custo de iniciar estruturas reprodutivas precocemente. Foram utilizados vasos plásticos de 6 L, com perfurações de drenagem e camada de brita fina no fundo para evitar encharcamento. O substrato de cultivo foi preparado pela mistura 1:1 de terra virgem peneirada e substrato comercial (turfa/casca compostada), resultando em meio leve e bem aerado. A adubação de base foi realizada com NPK 4-30-10 nas doses recomendadas para vasos de 6 L, completamente incorporada ao substrato antes do plantio. A irrigação foi conduzida de forma a manter o substrato úmido, porém não saturado, com a lâmina de água ajustada diariamente de acordo com a necessidade das plantas e a evapotranspiração observada.

Para obtenção das estacas matrizes, foram cultivados 100 vasos em uma única bancada, utilizando o material Convencional BR25 (GM 8.1). Cada vaso recebeu quatro sementes, visando garantir emergência mínima em todos os recipientes. Aos 7 dias após a emergência, realizou-se o desbaste, mantendo duas plantas vigorosas por vaso, assegurando uniformidade de estande e produção suficiente de biomassa para fornecimento de estacas. As plantas foram conduzidas sob ambiente protegido, com monitoramento fitossanitário preventivo e irrigação diária ajustada à demanda.

3.2 Instalação e delineamento experimental

Quando as plantas matrizes atingiram desenvolvimento vegetativo adequado, procedeu-se à coleta dos ramos laterais bem formados, que foram utilizados para a confecção de estacas caulinares de 15 cm de comprimento, mantendo um par de trifólios na porção apical. As folhas foram seccionadas à metade, quando necessário, para reduzir a perda de água por transpiração durante o enraizamento. As estacas foram preparadas com corte basal reto, em mesa limpa, utilizando lâmina esterilizada; o material recém-cortado foi mantido à sombra e sobre suporte úmido até a aplicação dos tratamentos, minimizando murcha. A base das estacas foi imersa por 15 s em solução de AIB, adotando o protocolo de imersão rápida (quick-dip), técnica atualmente recomendada pela eficiência, estudos recentes demonstraram que imersões curtas (~15 s) são mais eficazes para indução de raízes e evitam efeitos inibitórios relacionados ao excesso de exposição (Marlow & Harkess 2025). Em seguida, as unidades foram imediatamente alocadas no sistema aeropônico, inseridas nos colares de espuma, conforme o delineamento experimental. A ordem de inserção foi randomizada entre tratamentos, e as estacas foram etiquetadas para rastreabilidade. Todos os tratamentos foram conduzidos sob as mesmas condições ambientais e de solução nutritiva do sistema, garantindo uniformidade e repetibilidade da avaliação de enraizamento. Foram 4 equipamentos de aeroponia individuais com capacidade de 16 estacas cada, com as concentrações de 0, 750, 1500, e 3000 mg L⁻¹. O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente ao acaso (DIC), em esquema fatorial 4 × 2, composto por quatro doses de AIB (0, 750, 1500 e 3000 mg L⁻¹) e dois níveis de babosa (presença vs. ausência), com oito repetições. Cada repetição correspondeu à média de duas plantas por parcela, totalizando 64 unidades experimentais.

Os pressupostos da ANOVA bifatorial (normalidade dos resíduos e homogeneidade de variâncias) foram verificados; na ausência de interação AIB × babosa ($p > 0,05$), os efeitos principais foram interpretados e apresentados. Adicionalmente, foi calculada a matriz de correlação de Pearson (r) entre todas as variáveis morfofisiológicas e de rendimento, com teste de significância a 5% ($p \leq 0,05$).

Ao final, realizou-se uma comparação dirigida entre tratamentos e controles por meio do teste de Dunnett ($\alpha = 0,05$), contrastando as médias dos tratamentos com: o controle positivo (gel comercial), e o controle negativo (sem AIB, sem babosa e sem

gel). Esses controles foram analisados como grupos de comparação para avaliar ganhos práticos em relação à testemunha desfavorável (negativa) e a um padrão de referência de mercado (positiva).

3.3 Condução do ensaio

Após a exposição aos tratamentos com AIB e babosa, as estacas foram alocadas em sistema aeropônico. No segundo dia de condução, adicionou-se solução nutritiva contendo o coquetel comercial de micronutrientes YaraTera® REXOLIN CXK (K 12%, Zn 4,2%, Fe 3,4%, Mn 3,2%, B 1,5%, S 1,5%, Mg 1,2%, Cu 0,5% e Mo 0,05%), preparado e aplicado, conforme recomendação do fabricante. Durante todo o período inicial, manteve-se iluminação artificial contínua (fotoperíodo de 24 h) com o objetivo de evitar a indução floral e preservar o estágio vegetativo das plantas. As estacas permaneceram nesse ambiente até o término das avaliações de enraizamento e vigor inicial. Em seguida, foram transplantadas para vasos plásticos de 6 L com o substrato previamente descrito, passando a ser conduzidas sob luz natural ao longo do restante do ciclo, seguindo o manejo agrônomo (irrigação e adubação) adotado para a fase em vasos.

3.4 Tratamentos

Foram testadas diferentes concentrações de ácido indolbutírico (AIB) associadas a três formas de aplicação: solução convencional (sem adição de babosa), solução com extrato de babosa e gel enraizador comercial, utilizado como controle positivo.

a) Tratamento Convencional (solução de AIB sem aditivos)

Estacas imersas pelo método quick-dip (15 s) em solução de AIB na dose correspondente ao fator (0, 750, 1500 ou 3000 mg L⁻¹). A dose de 0 mg L⁻¹ correspondeu à testemunha sem aplicação de AIB, utilizada como controle negativo para comparação com as demais concentrações.

b) Tratamento Babosa (solução de AIB + extrato de *Aloe vera*)

No tratamento com babosa, foi utilizado extrato fresco de *Aloe vera* obtido artesanalmente, a partir de folhas adultas recém-colhidas. O material vegetal foi higienizado, cortado em pedaços e processado em liquidificador doméstico, sem adição de conservantes ou diluentes, resultando em um gel homogêneo que foi incorporado à solução de AIB imediatamente, após o preparo. A babosa tem sido apontada como alternativa orgânica aos hormônios sintéticos por conter auxinas naturais, giberelinas, ácido salicílico e polissacarídeos, que estimulam a formação de raízes adventícias (Mirihagalla & Fernando, 2020). A exemplo, em *Epipremnum aureum*, Villafuerte *et al.* (2022) observaram que estacas tratadas com gel de babosa apresentaram raízes significativamente mais longas que aquelas tratadas com hormônio sintético.

Neste contexto, a incorporação da babosa no protocolo experimental foi projetada para verificar se a adição ao tratamento com ácido indolbutírico (AIB) resulta em algum incremento significativo na taxa de enraizamento e no vigor das raízes das estacas de soja. Avaliar a eficácia da babosa é relevante, ela pode se mostrar uma alternativa natural e potencialmente econômica para o processo de enraizamento, especialmente em ambientes em que há restrição de insumos sintéticos.

As estacas foram tratadas pelo método quick-dip, sendo imersas por 15 segundos em soluções de AIB nas concentrações de 0, 750, 1500 ou 3000 mg L⁻¹. No tratamento com babosa, utilizou-se extrato fresco de *Aloe vera* diluído em água destilada, aplicado por imersão direta da base das estacas imediatamente antes do estaqueamento, conforme protocolos utilizados em estudos que avaliam a babosa como biopromotor radicular (Aryan *et al.*, 2023). Para a dose 0 mg L⁻¹, este fator permite avaliar babosa sem AIB, isolando o potencial efeito do extrato sobre o enraizamento.

c) Tratamento Gel (apenas na dose 0 mg L⁻¹ de AIB)

Este tratamento utilizou o gel comercial Clonex®, amplamente empregado na propagação vegetativa para promover o enraizamento de estacas. O produto contém 3.000 mg L⁻¹ (0,3 %) de AIB na formulação, a qual, em forma de gel, proporciona melhor adesão ao tecido vegetal, reduz perdas por escorrimento e oferece proteção inicial contra patógenos, além de liberar o hormônio de maneira gradual na base da estaca (Oakes *et al.*, 2020). No presente experimento, o Clonex® foi aplicado

exclusivamente na concentração de 0 mg L⁻¹ de AIB, ou seja, sem adição extra do hormônio, servindo como referência para comparação com os tratamentos que utilizam AIB em diferentes concentrações.

d) Preparo das soluções

Para o preparo das soluções de AIB empregou-se uma solução inicial de 3000 mg L⁻¹ (ppm), da qual foram obtidas, por diluições sucessivas 1:1, as concentrações intermediárias de 1500 mg L⁻¹ e 750 mg L⁻¹. O cálculo seguiu o princípio $C_1 \cdot V_1 = C_2 \cdot V_2$, assegurando conservação de massa do soluto em cada etapa. Na primeira diluição, metade da concentração foi obtida adicionando-se igual volume de água destilada à solução inicial: por exemplo, 300 mL da solução a 3000 mg L⁻¹ receberam 300 mL de água em balão volumétrico de 600 mL, resultando em 600 mL a 1500 mg L⁻¹. Na sequência, a nova solução foi novamente diluída 1:1 para atingir 750 mg L⁻¹: por exemplo, 600 mL a 1500 mg L⁻¹ receberam 600 mL de água em balão de 1200 mL, totalizando 1200 mL a 750 mg L⁻¹.

A opção por diluições sequenciais a partir de 3000 mg L⁻¹ teve três objetivos: uniformidade entre lotes (todas as doses derivam de uma mesma solução); economia de reagente (evita preparar múltiplas soluções independentes); e redução de erro operacional (a relação 1:1 simplifica medidas e minimiza desvios volumétricos). Como o protocolo de aplicação foi do tipo quick-dip (15 s), as soluções foram alocadas em recipientes individuais por tratamento com profundidade suficiente para imergir a base das estacas, utilizando alíquotas de uso único para evitar contaminação cruzada entre doses. Para manter a qualidade, as soluções foram protegidas da luz (frascos âmbar ou envoltos em alumínio), mantidas em temperatura ambiente controlada durante o uso e descartadas ao final do dia.

3.5 Parâmetros avaliados

3.5.1 Índices de clorofila

As avaliações foram realizadas em dois momentos distintos do cultivo: o primeiro durante a fase em sistema aeropônico e o segundo, 10 dias, após o transplântio. Entre as variáveis avaliadas, incluiu-se o índice SPAD, obtido por meio de clorofilômetro

portátil (Soil Plant Analysis Development). Esse índice fornece estimativa indireta do teor de clorofila foliar, sendo amplamente utilizado como indicador não destrutivo do estado nutricional, da capacidade fotossintética e do vigor das plantas (Xiong *et al.*, 2015).

3.5.2 Análises biométricas

Durante o experimento, as avaliações biométricas foram feitas em três momentos diferentes, para acompanhar o desenvolvimento das estacas de soja tratadas com diferentes doses, para capturar desde a resposta inicial ao AIB até os desfechos produtivos. A primeira avaliação aconteceu ainda na fase de enraizamento, dentro do sistema aeropônico. As coletas dos dados foram realizadas diariamente por 10 dias, após o início do enraizamento. Nestes dias foram avaliados, o comprimento das raízes, registrando o comprimento radicular com régua milimetrada, além da presença de calos e o vigor visual da parte aérea das estacas. As medições foram feitas sempre no mesmo horário e vinculadas ao ID individual das plantas para garantir rastreabilidade.

A segunda avaliação foi feita no momento que as estacas seriam transplantadas para vasos com substrato (1 planta por vaso). Nessa etapa, foram mensurados o comprimento do sistema radicular, a altura da planta, o diâmetro do caule na base com paquímetro digital e o volume de raízes por deslocamento de água em proveta graduada, em seguida, as plantas foram alocadas no substrato e conduzidas sob as condições previamente descritas.

Por fim, a terceira e última avaliação foi feita durante a colheita. repetiu-se a medida de altura e determinaram as massas secas de parte aérea e de raízes, após secagem em estufa de circulação forçada a $65 \pm 2^\circ\text{C}$ até peso constante (Raza *et al.* 2021), além dos componentes de rendimento, como número de vagens por planta, número de sementes por planta, peso total de sementes por planta e o peso de mil grãos. Esse encadeamento de avaliações permitiu integrar respostas precoces (enraizamento e vigor) ao estabelecimento vegetativo no transplântio e aos componentes de rendimento na colheita, viabilizando análises comparativas entre doses e subtratamentos.

3.5.3 Análise de dados

Para comparar os tratamentos destaques com o gel comercial, foi realizado o teste de Dunnett a 5% de probabilidade, considerando ausência de enraizador como controle negativo e o gel comercial como controle positivo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise dos dados (Tabelas 1 e 2) demonstrou ausência de interação significativa entre os fatores avaliados (doses de AIB e uso de babosa) para a maioria das variáveis, com exceção do comprimento de folhas, que apresentou interação significativa entre os fatores na fase inicial de enraizamento. Isso indica que, para as demais variáveis, os efeitos puderam ser interpretados de forma independente. Assim, as doses de AIB foram analisadas isoladamente quanto ao seu impacto sobre o crescimento e desenvolvimento das estacas de soja.

Além disso, embora a aplicação de babosa, de forma isolada, não tenha promovido diferenças significativas, a interação entre babosa e AIB resultou em efeito significativo sobre o comprimento de folhas, conforme evidenciado na Tabela 1. Para as demais variáveis, não foram observadas diferenças significativas em nenhuma fase de avaliação, indicando que a utilização da babosa não alterou de forma consistente o desempenho morfofisiológico ou produtivo das estacas de soja nas condições testadas.

Tabela 1. Resumo do quadro de análise de variância (ANOVA), considerando p-valor para as variáveis avaliadas na fase inicial de enraizamento de estacas de soja, em função de diferentes doses de ácido indolbutírico (AIB: 0, 750, 1500 e 3000 mg L⁻¹), com e sem aplicação de babosa.

FV	COMP. ESTACAS	DIAMETRO ESTACAS	Nº FOLHAS	COMP. FOLHAS	CLOROFILA	COMP. RAIZ	VOLUME RAIZ
Doses	0.0000*	0.3343 ns	0.0000*	0.0000*	0.0000*	0.0000*	0.0007*
Babosa	0.1578 ns	0.4198 ns	0.4927 ns	0.3587 ns	0.0961 ns	0.466ns	0.1032 ns
Doses+Babosa	0.2551 ns	0.5655 ns	0.8555 ns	0.0498*	0.8264 ns	0.3861ns	0.8583 ns
CV (%)	5.9	111.43	27.22	14.21	20.72	20.46	38.71

FV: Fonte de variação. “*” significativo a 5% de probabilidade pelo teste F; “ns” não significativo. CV: coeficiente de variação.

Tabela 2. Resumo do quadro de análise de variância, considerando p-valor para as variáveis avaliadas na colheita das plantas de soja, em função de diferentes doses de ácido indolbutírico (AIB: 0, 750, 1500 e 3000 mg L⁻¹), com e sem aplicação de babosa.

FV	ALTURA	Nº VAGENS	Nº SEMENTES	PMG	MSPA	MSR
Doses	0.0000*	0.0000*	0.0000*	0.0000*	0.0000*	0.0000*
Babosa	0.1888 ns	0.3215 ns	0.506 ns	0.7447ns	0.2244 ns	0.4372 ns
Doses+Babosa	0.3602 ns	0.8727 ns	0.8563 ns	0.6848ns	0.5081 ns	0.4198 ns
CV (%)	14.94	25.63	28.19	28.4	32.69	25.7

FV: Fonte de variação. “*” significativo a 5% de probabilidade pelo teste F; “ns” não significativo. CV: coeficiente de variação. PMG: peso de mil grãos; MSPA: massa seca da parte aérea; MSR: massa seca de raízes.

De forma geral, a aplicação de babosa, seja isoladamente ou associada ao AIB, não resultou em alterações significativas nas variáveis fitotécnicas avaliadas, tanto na fase inicial quanto na fase final de cultivo, conforme demonstrado pelos valores de probabilidade apresentados nas Tabelas 1 e 2. Esse resultado sugere que, nas condições testadas, a utilização da babosa não promoveu ganhos expressivos no desempenho morfofisiológico ou produtivo das estacas de soja.

4.1 Efeito do AIB no crescimento inicial das estacas

Diferentes concentrações de ácido indolbutírico (AIB) exerceram efeito significativo sobre variáveis morfológicas na fase inicial de desenvolvimento das estacas de soja, incluindo comprimento de estacas, número de folhas, comprimento de folhas, comprimento de raízes e volume radicular. De forma geral, as menores doses de AIB promoveram melhor desempenho nessas variáveis, enquanto doses mais elevadas resultaram em reduções médias em parâmetros como comprimento de estacas e desenvolvimento radicular (Figura 1A).

Para o diâmetro de estacas (Figura 1B), não foram observadas diferenças significativas entre as doses, indicando que esta característica não foi afetada pelo regulador nas condições do estudo.

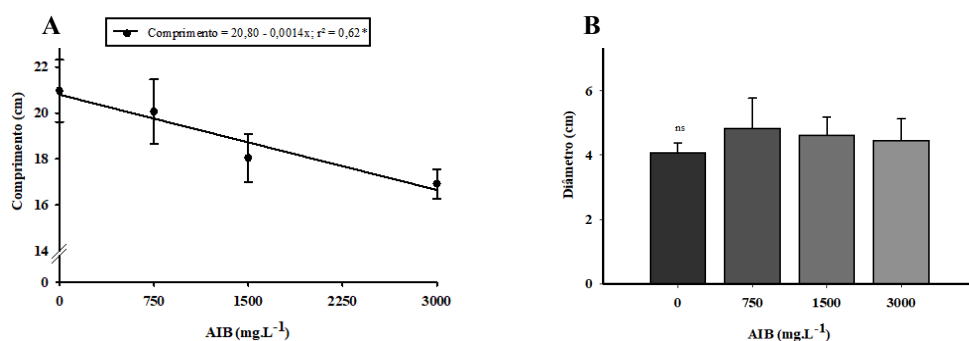


Figura 1 – (A) Comprimento médio de estacas de soja submetidas ao efeito de diferentes doses de ácido indolbutírico (AIB) (mg.L⁻¹). Barra = Desvio Padrão. (B) Diâmetro médio de estacas de soja submetidas ao efeito de diferentes doses de ácido indolbutírico (AIB) (mg.L⁻¹). Barra = Desvio Padrão. ns= Não significativo pelo teste F ao nível de 5% de probabilidade.

Observou-se tendência linear decrescente no comprimento médio das estacas de soja à medida que aumentaram as doses de AIB, ajustando-se ao modelo $\hat{y} = 20,80 - 0,0014 \cdot x$ ($R^2 = 0,62$). Em relação à dose 0 mg L⁻¹ (20,80 cm), verificaram reduções de 5,0%, 9,6% e 20,2% para as doses de 750, 1500 e 3000 mg L⁻¹, respectivamente. Esse comportamento está de acordo com a fisiologia das auxinas, podendo, em concentrações elevadas, promover desbalanço hormonal e induzir síntese de etileno, levando à redução da elongação celular e possível redirecionamento de assimilados para o sistema radicular em detrimento da parte aérea (Taiz *et al.* 2017). Resultados semelhantes foram relatados por Nogueira *et al.* (2018), que observaram comprometimento do crescimento apical de estacas de soja em doses elevadas de AIB, mesmo com favorecimento do enraizamento. Estudos mais recentes, como o de Garzón *et al.* (2023), também indicam que a elevação excessiva de auxina pode reduzir atributos de crescimento vegetativo, ainda que mantenha ou acelere a iniciação radicular em determinados contextos.

Na Figura 1B, referente ao diâmetro das estacas, não foram verificadas diferenças significativas entre as doses de AIB pelo teste F a 5 % de probabilidade, com médias variando entre 4,5 e 4,8 cm. A estabilidade dessa variável sugere que o diâmetro caulinar inicial teve menor sensibilidade à variação da concentração de auxina no curto prazo, diferindo de parâmetros como comprimento, número de folhas e atributos radiculares, que tendem a responder mais rapidamente ao regulador (Garzón *et al.* 2023).

Em ambos os casos, a aplicação de extrato de babosa não resultou em diferenças, independentemente da dose de AIB utilizada. Tal achado está em consonância com estudos recentes sobre o uso da babosa como bioestimulante, que relatam respostas positivas em determinadas espécies e condições experimentais (Alkuwayti, 2022; Wise *et al.*, 2024), mas também ausência de efeito em contextos específicos, como em

espécies leguminosas, em formulações diluídas ou quando aplicadas em ambientes com elevada disponibilidade hídrica e nutricional. Esses resultados reforçam que a eficácia da babosa depende fortemente da espécie, da forma de preparo e das condições ambientais.

Considerando que o crescimento e a morfologia foliar são diretamente influenciados pelo balanço hormonal e pela disponibilidade de assimilados, torna-se relevante examinar o número de folhas e o comprimento médio das folhas (Figura 2 A e B) como indicadores adicionais da resposta vegetativa. Essas variáveis, por estarem associadas à capacidade fotossintética e ao potencial de acúmulo de biomassa, permitem compreender de forma mais abrangente os efeitos do regulador sobre o desempenho das estacas durante o período inicial de enraizamento e crescimento.

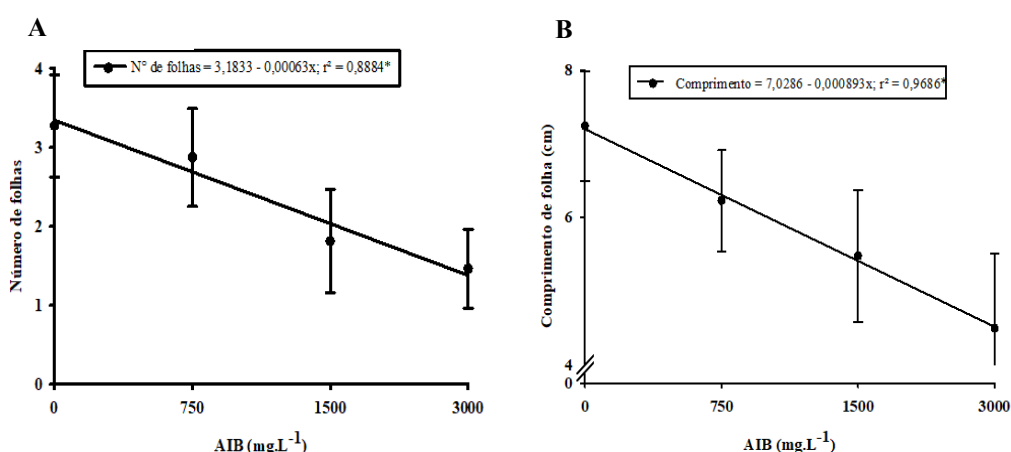


Figura 2 – (A) Número médio folhas nas estacas de soja submetidas ao efeito de diferentes doses de ácido indolbutírico (AIB) (mg.L⁻¹). Barra = Desvio Padrão. ^{ns}= Não significativo pelo teste F ao nível de 5% de probabilidade. (B) Comprimento médio folhas das estacas de soja submetidas ao efeito de diferentes doses de ácido indolbutírico (AIB) (mg.L⁻¹). Barra = Desvio Padrão

Para o número de folhas (Figura 2A), a análise de variância indicou ausência de diferenças entre as doses de AIB pelo teste F a 5% de probabilidade, com médias variando de forma estreita em todo o intervalo de 0 a 3000 mg L⁻¹ (redução de apenas 3,4 % na maior dose em relação à testemunha). Esse resultado sugere que a aplicação de AIB, nas concentrações testadas, não influenciou de forma determinante a emissão de novas folhas na fase inicial de desenvolvimento das estacas. A estabilidade desse parâmetro indicou que o estímulo hormonal proporcionado pelo AIB concentrou-se mais intensamente nos tecidos basais, favorecendo processos de iniciação radicular, do que na dominância apical, responsável pela emissão foliar. Estudos recentes reforçam que auxinas exógenas aplicadas em estacas são rapidamente transportadas para a base, acumulando em níveis

suficientes para induzir diferenciação radicular, mas sem impacto significativo sobre a indução foliar, podendo inclusive suprimir brotações axilares em determinados contextos (Taiz *et al.* 2017; Bai *et al.* 2020).

Quanto ao comprimento médio das folhas (Figura 2B), observou-se tendência de decréscimo com o aumento das doses, com reduções estimadas de 11,8% na dose 750 mg L⁻¹, 24,5 % na dose 1500 mg L⁻¹ e 35,7 % na dose 3000 mg L⁻¹ em comparação à testemunha. Essa resposta negativa pode estar relacionada ao redirecionamento de assimilados e energia metabólica para a formação e sustentação do sistema radicular em detrimento da expansão foliar, padrão já descrito em estacas de soja e outras espécies submetidas a doses elevadas de AIB (Nogueira *et al.* 2018; Garzón *et al.* 2023). Além disso, concentrações supra-ótimas de auxina podem promover aumento da síntese de etileno, hormônio que atua como inibidor do alongamento celular, comprometendo a expansão foliar.

No que se refere ao uso de babosa, não foram detectadas diferenças significativas nem para o número de folhas, nem para o comprimento foliar, em qualquer dose de AIB.

Enquanto as variáveis morfológicas refletem a expansão e formação de novos tecidos foliares, os teores de clorofila estão diretamente associados à capacidade fotossintética e ao estado nutricional das folhas, especialmente quanto ao nitrogênio. Assim, mesmo na ausência de mudanças no número ou comprimento de folhas, podem ocorrer ajustes fisiológicos internos, perceptíveis por alterações no índice SPAD ou no verdor foliar.

Nesse sentido, a Figura 3 apresenta as respostas do teor de clorofila às diferentes doses de AIB, permitindo verificar se o padrão observado na morfologia foliar se traduz em modificações fisiológicas durante o enraizamento das estacas.

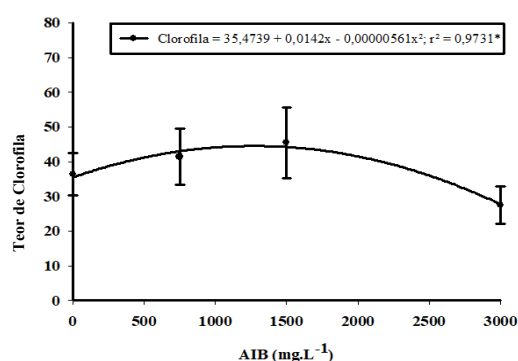


Figura 3 – Teor de clorofila das folhas das estacas de soja submetidas ao efeito de diferentes doses de ácido indolbutírico (AIB) (mg.L⁻¹). Barra = Desvio Padrão.

O teor de clorofila respondeu de forma quadrática às doses de AIB ($r^2 = 0,9731$), com máximo teórico em ~ 1.266 mg L⁻¹ de AIB (momento em que atingiu 43,12 de clorofila). As estimativas foram: 0 mg L⁻¹ = 35,47, na dose de 750 mg L⁻¹ = 42,97 (aumento de 21,1%), na dose de 1500 mg L⁻¹ = 44,15 (aumento de 24,5%) e na dose de 3000 mg L⁻¹ = 27,58 (redução de 22,2%). Em termos fisiológicos, o ganho observado em doses moderadas é compatível com melhor estabelecimento radicular e estado nutricional durante o enraizamento, refletindo em maior verdor foliar (Hu *et al.* 2021). Por outro lado, a queda em 3000 mg L⁻¹ é coerente com a literatura de interação auxina e etileno, na qual o excesso de auxina desencadeia sinais etilênicos que restringem alongação e desempenho fotossintético (Zhang *et al.* 2018).

Em síntese, a faixa 750 - 1500 mg L⁻¹ mostra-se favorável à elevação do teor de clorofila durante o enraizamento, enquanto 3000 mg L⁻¹ deve ser evitada para preservar o status fotossintético.

4.2 Avaliações radiculares

Com a transição da fase inicial de enraizamento para o momento do transplantio, foram realizadas avaliações detalhadas do sistema radicular das estacas de soja, a fim de compreender os efeitos das diferentes concentrações de ácido indolbutírico (AIB) sobre o crescimento das raízes. Durante todo o período em que as estacas permaneceram no sistema aeropônico, o comprimento das raízes foi monitorado diariamente.

Essa abordagem permitiu acompanhamento preciso da dinâmica de enraizamento, culminando nas mensurações consolidadas de comprimento e volume no momento do transplântio.

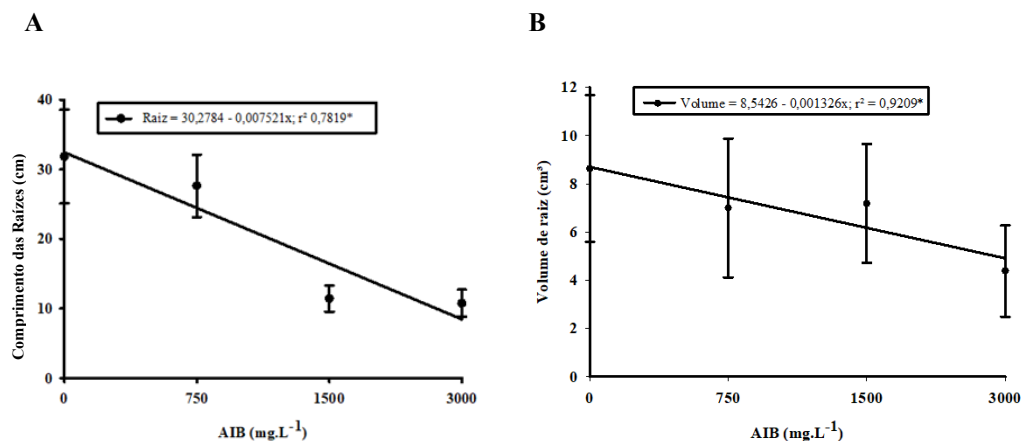


Figura 4 – (A) Comprimento da raízes nas estacas de submetidas ao efeito de diferentes doses de ácido indolbutírico (AIB) (mg.L⁻¹). Barra = Desvio Padrão. (B) Volume das raízes em estacas de soja submetidas ao efeito de diferentes doses de ácido indolbutírico (AIB) (mg.L⁻¹). Barra = Desvio Padrão.

Na Figura 4A, observa-se que o comprimento final das raízes apresentou tendência decrescente com o aumento das doses de AIB, com valores médios de 37,9 cm em 0 mg L⁻¹, 32,3 cm em 750 mg L⁻¹ (redução de 14,8 %), 25,4 cm em 1500 mg L⁻¹ (redução de 33,0 %) e 13,1 cm em 3000 mg L⁻¹ (redução de 65,4 %). Apesar de a auxina ser essencial para a iniciação radicular, doses supra-ótimas podem provocar desbalanço hormonal, intensificando a produção de etileno e inibindo a elongação celular, explicando a acentuada queda nas doses mais altas (Taiz *et al.*, 2017; Bai *et al.*, 2020). Resultados semelhantes foram reportados por Nogueira *et al.* (2018), que observaram melhor rizogênese em concentrações intermediárias de AIB (1500–2000 mg L⁻¹), enquanto níveis excessivos comprometeram o crescimento radicular, em consonância com os resultados obtidos neste estudo (Figura 4).

De forma semelhante, o volume de raízes (Figura 4B) apresentou decréscimo progressivo com o aumento das doses de AIB, partindo de 9,4 cm³ na testemunha para 8,3 cm³ em 750 mg L⁻¹ (redução de 11,7 %), 6,3 cm³ em 1500 mg L⁻¹ (redução de 33,0 %) e 5,3 cm³ em 3000 mg L⁻¹ (redução de 43,6 %). A redução simultânea de comprimento e volume indica que a arquitetura radicular foi afetada de forma geral, resultando em menor ramificação e área superficial reduzida para absorção. Em sistemas aeropônicos, esse efeito é relevante, pois a alta oxigenação e disponibilidade de nutrientes tendem a favorecer raízes mais volumosas quando há equilíbrio hormonal (Garzón *et al.*, 2023).

Quanto ao uso de babosa, não foram observadas diferenças significativas no crescimento radicular, independentemente da dose de AIB, sugerindo que, nas condições avaliadas, o efeito do regulador sobrepôs-se a possíveis benefícios do extrato vegetal.

4.3 Avaliações de parâmetros de colheita

A análise dos dados apresentados na Figura 5 mostra que a aplicação de diferentes concentrações de AIB afetou significativamente a altura final das plantas de soja. Verifica-se redução progressiva na altura com o aumento das doses, sendo os maiores valores observados no controle (0 mg L⁻¹) e os menores na dose mais alta (3000 mg L⁻¹). As doses intermediárias (750 e 1500 mg L⁻¹) apresentaram valores intermediários, sem superar a testemunha.

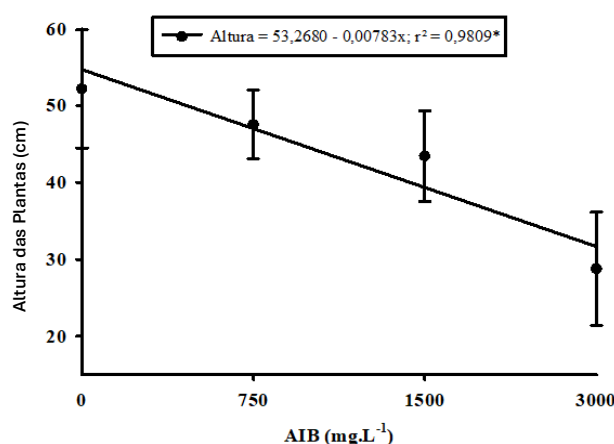


Figura 5 – Altura das plantas de soja submetidas ao efeito de ácido indolbutírico (mg.L⁻¹). Barra = Desvio Padrão.

A altura final das plantas ajustou-se ao modelo linear decrescente em função da dose de AIB ($\hat{y} = 53,2680 - 0,00783 \cdot x$; $R^2 = 0,9809$), indicando redução progressiva do porte com o aumento da concentração. As médias por dose foram 52,06 cm em 0 mg L⁻¹, 47,56 cm em 750 mg L⁻¹ (redução de 8,6%), 43,44 cm em 1500 mg L⁻¹ (redução de 16,6%) e 28,80 cm em 3000 mg L⁻¹ (redução de 44,7%), confirmando que a maior estatura ocorreu na testemunha e que doses elevadas deprimiram o crescimento. Esse padrão é consistente com a fisiologia de auxinas: embora o AIB seja essencial para estimular a rizogênese, concentrações acima do nível ideal podem intensificar a interação entre auxina e etileno, o que limita a elongação celular e, consequentemente, reduz a altura das plantas. (Taiz *et al.* 2017; Bai *et al.* 2020). Em soja por estaquia,

concentrações moderadas tendem a favorecer o enraizamento inicial, ao passo que níveis excessivos comprometem o crescimento subsequente da parte aérea, como também discutido por Nogueira *et al.* (2018).

Quanto as estacas tratadas com babosa, as médias de altura por dose foram, para babosa vs. sem babosa: 0 mg L⁻¹: 56,0 vs. 49,0 cm (aumento em 14,3% com a utilização da babosa); em 750 mg L⁻¹: 48,63 vs. 46,50 cm (aumento em +4,6%); em 1500 mg L⁻¹: 45,13 vs. 41,75 cm (aumento em +8,1%) e em 3000 mg L⁻¹: 28,29 vs. 29,25 cm (redução de 3,3% com a utilização da babosa). As diferenças são pequenas e inconsistentes entre doses e, à luz dos desvios-padrão observados, não configuraram efeito significativo. Esse resultado é compatível com estudos recentes sobre babosa como bioestimulante, que reportam efeitos dependentes de espécie, formulação e dose, com ocorrências tanto de ganhos pontuais quanto de ausência de efeito sob determinadas condições (Alkuwayti 2022; Wise *et al.* 2024).

Em síntese, a dose de 3000 mg L⁻¹ mostrou-se claramente fitotóxica para a altura e a babosa não alterou o padrão de resposta.

Após a análise da altura de plantas, os componentes de rendimento foram investigados, com destaque para o número de vagens e o número de sementes por planta (Figura 6). Esses parâmetros são determinantes na produtividade final e podem refletir indiretamente os efeitos fisiológicos do AIB durante a fase inicial de enraizamento.

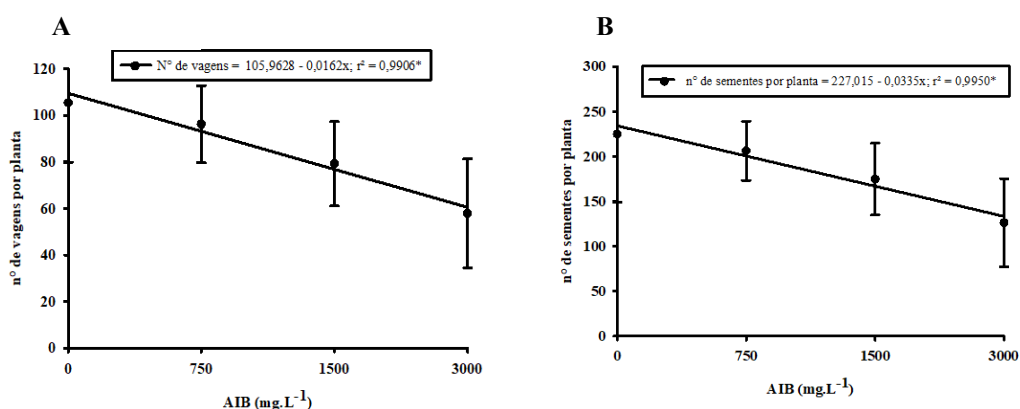


Figura 6 – (A) Número de vagens por planta de soja submetidas ao efeito de ácido indolbutírico (mg.L⁻¹). Barra = Desvio Padrão. (B) Número de sementes por planta de soja submetidas ao efeito de ácido indolbutírico (mg.L⁻¹). Barra = Desvio Padrão.

Conforme a Figura 6A, o número de vagens por planta decresceu linearmente com o aumento da dose de AIB ($\hat{y} = 105,9628 - 0,0162 \cdot x; r^2 = 0,9906$). As médias observadas foram 103,13 em 0 mg L⁻¹, 96,19 em 750 mg L⁻¹ (redução de 6,7%), 79,19 em 1500 mg L⁻¹ (redução de 23,2%) e 57,80 em 3000 mg L⁻¹ (redução de 44,0%) vagens por planta. Do mesmo modo, o número de sementes por planta (Figura 6B) mostrou

queda progressiva ($\hat{y} = 227,015 - 0,0335 \cdot x$; $r^2 = 0,9950$), com médias de 219,06 em 0 mg L⁻¹, 206,19 em 750 mg L⁻¹ (redução de 5,9%), 174,75 em 1500 mg L⁻¹ (redução de 20,2%) e 126,40 em 3000 mg L⁻¹ (redução de 42,3%). Esses resultados evidenciam que, nas condições deste experimento, concentrações acima da faixa ideal de AIB resultaram em menor formação de estruturas reprodutivas. Tal resposta pode estar associada a múltiplos mecanismos fisiológicos. Um deles é o desbalanço hormonal, no qual o excesso de auxina estimula a produção endógena de etileno, desencadeando interações negativas que reduzem a elongação celular e limitam o acúmulo de biomassa vegetativa indispensável para sustentar o desenvolvimento reprodutivo (Taiz *et al.*, 2017; Bai *et al.*, 2020).

Além disso, concentrações supra-ótimas de AIB podem afetar o particionamento de assimilados, redirecionando energia e recursos para a formação radicular em detrimento da parte aérea e órgãos reprodutivos. Também podem ocorrer inibições diretas em meristemas reprodutivos ou alterações no balanço entre auxinas, giberelinas e citocininas, que são essenciais para a indução floral e o enchimento de vagens.

Em soja propagada por estaquia, os efeitos benéficos do AIB ocorrem em faixas moderadas, ao passo que níveis excessivos penalizam o desempenho reprodutivo, padrão já relatado em estudos sobre propagação vegetativa e uso de auxinas (Nogueira *et al.*, 2018; Garzón *et al.*, 2023).

No fator babosa, as diferenças foram pequenas e inconsistentes entre doses, não caracterizando efeito significativo: para vagens, Babosa vs. sem Babosa foi 11,7% maior em 750 mg L⁻¹, 9,4% maior em 1500 mg L⁻¹ e 2,1% maior em 3000 mg L⁻¹ em relação a dose 0 para sementes, +6,8% (750 mg L⁻¹), +13,4% (1500 mg L⁻¹) e -3,9% (3000 mg L⁻¹). À luz dos desvios e da tendência global negativa induzida pelo AIB em altas doses, conclui-se que a babosa não alterou o padrão de resposta dos componentes de rendimento nas condições avaliadas, quadro coerente com a literatura recente que descreve efeitos contexto-dependentes da babosa como bioestimulante (Alkuwayti 2022; Wise *et al.* 2024).

O peso de mil grãos (PMG) reduziu linearmente com o aumento das concentrações de ácido indolbutírico (AIB), conforme evidenciado na Figura 7. As plantas oriundas de estacas não tratadas (0 mg L⁻¹) tiveram maior PMG, enquanto as submetidas à dose mais elevada (3000 mg L⁻¹) os menores, representando redução de aproximadamente 40% em relação à testemunha (Figura 7).

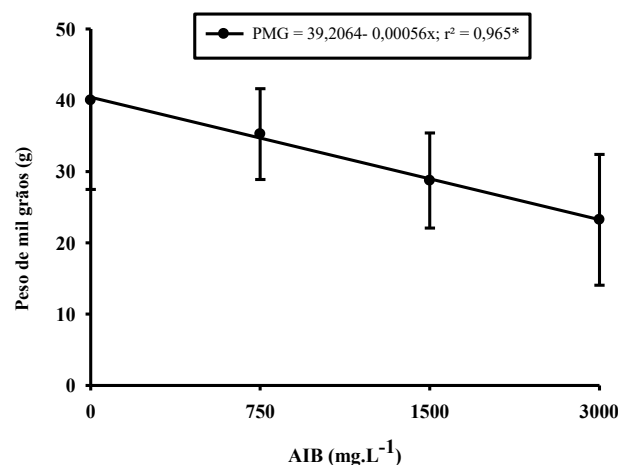


Figura 7 – Peso de mil grãos (PMG) coletados nas estacas de soja submetidas ao efeito de ácido indolbutírico (mg.L⁻¹). Barra = Desvio Padrão.

Os resultados referentes ao peso de mil grãos (Figura 7) indicaram tendência linear negativa em função das doses de AIB, descrita pela equação $\hat{y} = 39,2064 - 0,00056 \cdot x$ ($r^2 = 0,965$). As médias estimadas foram de 39,21g em 0 mg L⁻¹, 38,79g em 750 mg L⁻¹ (redução de 1,07 %), 38,37g em 1500 mg L⁻¹ (redução de 2,14 %) e 37,53g em 3000 mg L⁻¹ (redução de 4,29 %) em relação à testemunha. Embora a redução seja moderada, o padrão observado é consistente. Nos tratamentos com adição babosa, não foram detectadas diferenças consistentes para o PMG em comparação ao tratamento sem adição de babosa, reforçando a ausência de efeito prático nas condições experimentais avaliadas.

A avaliação da massa seca da parte aérea das estacas de soja evidenciou efeito linear decrescente em função das doses de AIB (Figura 8A). O maior acúmulo de biomassa aérea foi observado na ausência do regulador, com redução progressiva à medida que a concentração de AIB aumentou até 3000 mg L⁻¹. Esse resultado indica que, para esta variável, o incremento de auxina exerceu efeito inibitório sobre o crescimento vegetativo, possivelmente devido ao excesso de AIB intensificar a interação com o etileno, restringindo a elongação celular e o acúmulo de matéria seca (Taiz *et al.* 2017).

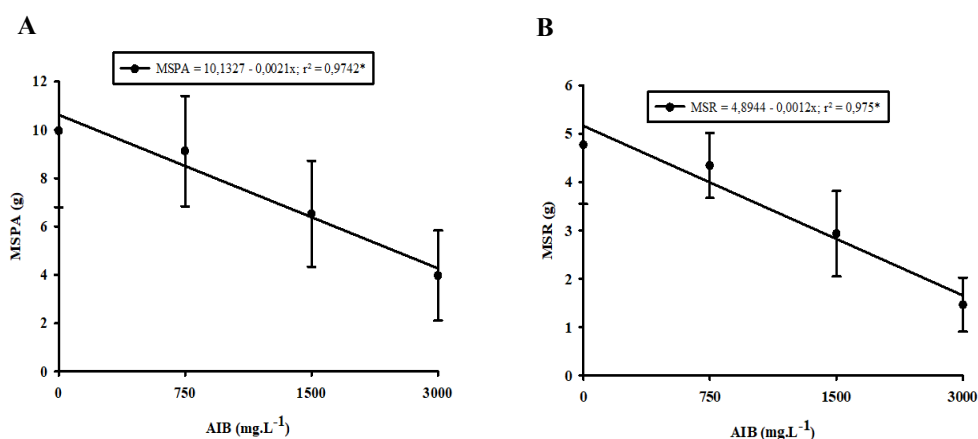


Figura 8 – (A) Massa seca da parte aérea das estacas de soja submetidas ao efeito do AIB. Barra = Desvio Padrão. (B) Massa seca da raiz das estacas de soja submetidas ao efeito do AIB. Barra = Desvio Padrão.

A massa seca da parte aérea (Figura 8A) decresceu de forma linear com o aumento das doses de AIB, ajustando-se ao modelo $\hat{y} = 10,1327 - 0,0021 \cdot x$ ($r^2 = 0,9742$). Em comparação à testemunha (0 mg L^{-1}), as reduções foram de 4,8% em 750 mg L^{-1} , 31,8% em 1500 mg L^{-1} e 58,6% em 3000 mg L^{-1} . Esse padrão é compatível com a ação de auxina, que pode intensificar a sinalização de etileno e restringir a elongação celular, reduzindo o acúmulo de biomassa aérea (Taiz *et al.* 2017; Bai *et al.* 2020). Em propagação de soja por estaquia, ganhos costumam ocorrer em faixa moderada de AIB, ao passo que níveis elevados tendem a penalizar o crescimento vegetativo, como relatado na literatura recente para sistemas de alta oxigenação (Nogueira *et al.* 2018; Garzón *et al.* 2023). Não houve diferenças entre as estacas tratadas com babosa e estacas sem a adição de babosa para MSPA em nenhuma dose, apontando ausência de efeito prático do extrato nas condições avaliadas.

A massa seca de raiz (Figura 8B) também apresentou tendência linear negativa em função da dose, descrita por $\hat{y} = 4,8944 - 0,0012 \cdot x$ ($r^2 = 0,975$). As reduções frente à dose 0 mg L^{-1} foram de 5,7% em 750 mg L^{-1} , 36,3% em 1500 mg L^{-1} e 68,2% em 3000 mg L^{-1} . A queda observada em 3000 mg L^{-1} indica possível efeito fitotóxico, associado ao excesso de auxina e ao aumento da ação do etileno, reduzindo o crescimento e a deposição de matéria seca nas raízes. (Taiz *et al.* 2017; Bai *et al.* 2020). Estudos com estaquia e AIB mostram que, ultrapassado o ponto ótimo, há comprometimento da arquitetura radicular e do desempenho subsequente, mesmo em ambientes favoráveis. (Nordström *et al.* 1991; Garzón *et al.* 2023). Não houve efeito significativo da babosa sobre a MSR em nenhuma das doses.

Com o objetivo de compreender as inter-relações entre as variáveis avaliadas, elaborou-se um mapa de correlação (Figura 9). Observou-se forte associação positiva entre variáveis produtivas, como número de vagens, número de sementes, massa seca de parte aérea e peso de mil grãos ($r > 0,70$; $p < 0,001$). Esse padrão indica que a produtividade da soja em condição de clonagem é fortemente dependente da integração desses caracteres, corroborando relatos da literatura (Nogueira *et al.* 2018; Garzón *et al.* 2023). Por outro lado, características radiculares apresentaram correlações mais fracas com variáveis produtivas, sugerindo que o maior desenvolvimento radicular inicial, apesar de favorecer o estabelecimento, não se refletiu diretamente em ganhos de produção. Esses achados reforçam a interpretação de que o uso de AIB, embora eficiente no enraizamento, não promoveu incrementos consistentes no desempenho agrônômico final das estacas.

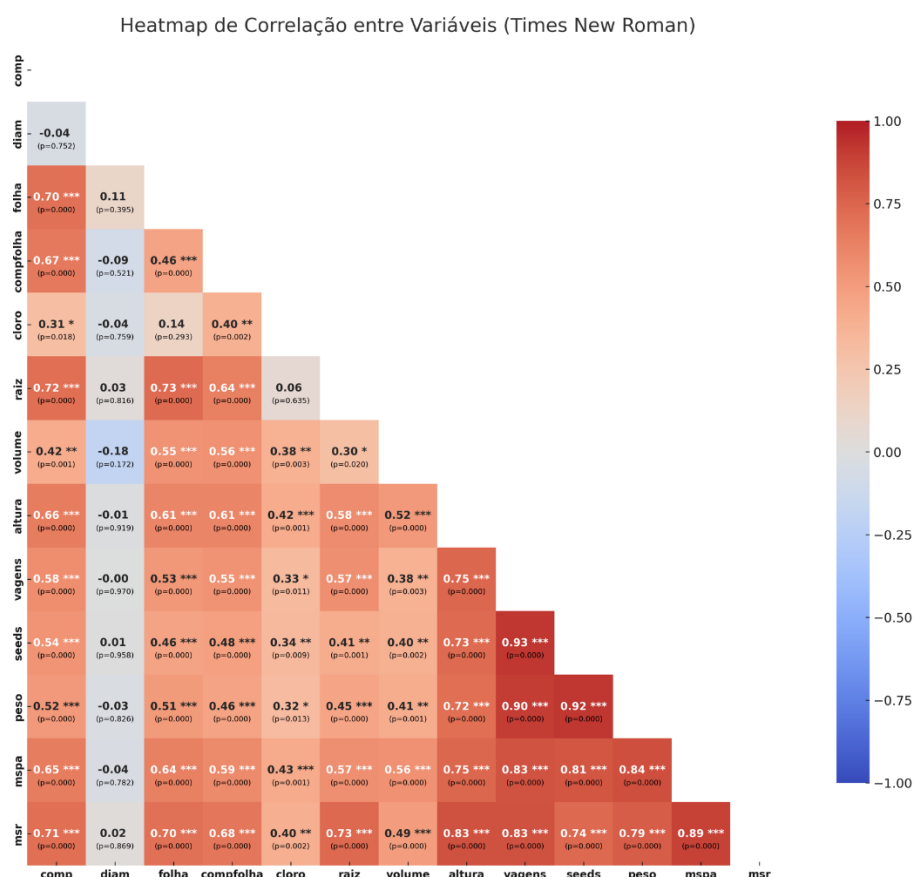


Figura 9 – Mapa de correlação de Pearson entre as variáveis morfofisiológicas e produtivas avaliadas em estacas de soja submetidas a diferentes doses de ácido indolbutírico (AIB), em sistema aeropônico.

5. CONCLUSÕES

O presente estudo confirmou a viabilidade da propagação vegetativa de estacas de soja em sistema aeropônico com aplicação de ácido indolbutírico (AIB), estabelecendo uma metodologia eficiente e reprodutível para uso em programas de melhoramento genético. Doses elevadas de AIB (3000 mg L⁻¹) apresentaram efeito inibitório sobre o crescimento vegetativo e reprodutivo, enquanto doses intermediárias (750 e 1500 mg L⁻¹) proporcionaram melhor desempenho morfológico inicial, sobretudo em comprimento de estacas e desenvolvimento radicular, embora sem reflexos produtivos consistentes. O tratamento com o gel comercial Clonex® (0,3 % de AIB) apresentou desempenho estável e reprodutível, servindo como referência prática para protocolos de enraizamento. A aplicação de extrato de babosa não apresentou efeito significativo sobre as variáveis avaliadas, mas também não causou prejuízos ao desenvolvimento das estacas. De modo geral, concentrações moderadas de AIB ou formulações comerciais balanceadas mostraram-se mais adequadas para determinados objetivos fisiológicos, especialmente na fase inicial de enraizamento. Assim, a estaquia associada ao uso criterioso de reguladores de crescimento configura-se como uma estratégia promissora para a multiplicação rápida de genótipos elite, sendo recomendadas pesquisas adicionais para o ajuste fino das concentrações e avaliação de possíveis sinergias com outros bioestimulantes.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alkuwayti, M. A., Aldayel, M. F., Yap, Y. K., & El Sherif, F. 2022. Exogenous application of Aloe vera leaf extract improves silybin content in *Silybum marianum* L. by up-regulating chalcone synthase gene. *Agriculture*, 12(10), 1649.
- Aryan, S., Gulab, G., Safi, Z., Durani, A., Raghieb, M. G., Kakar, K., ... & Elansary, H. O. 2023. Enhancement of propagation using organic materials and growth hormone: A study on the effectiveness of growth and rooting of pomegranate cuttings. *Horticulturae*, 9(9), 999.
- Bai, T., Dong, Z., Zheng, X., Song, S., Jiao, J., Wang, M., & Song, C. (2020). Auxin and its interaction with ethylene control adventitious root formation and development in apple rootstock. *Frontiers in Plant Science*, 11, 574881.

Begum, N., Zenat, E. A., Sarkar, M. K., K Roy, C., Munshi, J. L., & A Jahan, M. A. 2019. In vitro micro propagation of soybean (*Glycine max*) BARI-5 variety. *The Open Microbiology Journal*, 13(1).

Cai, J., Veerappan, V., Arildsen, K., Sullivan, C., Piechowicz, M., Frugoli, J., & Dickstein, R. 2023. A modified aeroponic system for growing small-seeded legumes and other plants to study root systems. *Plant Methods*, 19(1), 21.

Chang, Y., Xue, T., Peñuelas, J., Sardans, J., Zhou, J., Zhou, Y., ... & Li, B. 2024. A novel rejuvenation approach to improve rooting capacity and its mechanism in *Cunninghamia lanceolata*. *Forest Ecology and Management*, 563, 121992.

Corbellini, M., Bobek, D. V., de Toledo, J. F. F., Ferreira, L. U., Santana, D. C., Gilio, T. A. S., ... & Tardin, F. D. 2024. Geographical adaptability for optimizing the recommendation of soybean cultivars in the Brazilian Cerrado. *Scientific Reports*, 14(1), 13076.

Garzón, J., Montes, L., Garzón, J., & Lampropoulos, G. 2023. Systematic review of technology in aeroponics: Introducing the technology adoption and integration in sustainable agriculture model. *Agronomy*, 13(10), 2517.

Hata, N., & Futamura, H. 2020. Production of soybean plants for hydroponic cultivation from seedling cuttings in a medium containing rhizobium inoculum depending on various concentrations of nutrient solution and different nitrogen sources. *Journal of Horticultural Research*, 28(2), 71-82.

Hu, Q. Q., Shu, J. Q., Li, W. M., & Wang, G. Z. 2021. Role of auxin and nitrate signaling in the development of root system architecture. *Frontiers in Plant Science*, 12, 690363.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Produção Agrícola Municipal – LSPA – Levantamento Sistemático da Produção Agrícola. Rio de Janeiro: IBGE, 2024. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/>. Acesso em: 14 jul. 2025.

Kumari, S., Dambale, A. S., Samantara, R., Jincy, M., & Bains, G. 2025. Introduction, history, geographical distribution, importance, and uses of soybean (*Glycine max* L.). In *Soybean Production Technology: Physiology, Production and Processing* (pp. 1-17). Singapore: Springer Nature Singapore.

Lesmes-Vesga, R. A., Chaparro, J. X., Sarkhosh, A., Ritenour, M. A., Cano, L. M., & Rossi, L. 2021. Effect of propagation systems and indole-3-butyric acid potassium salt (K-IBA) concentrations on the propagation of peach rootstocks by stem cuttings. *Plants*, 10(6), 1151.

- Lima, C. C., Ohashi, S. T., Simões, P. H., Oliveira Jucoski, G., Silva, P. A., da Silva, J. P., & de Oliveira Neto, C. F. 2019.** Effect of indol-3-butyric acid (IBA) on rooting of cuttings of *Schizolobium parahyba* 'var. 'amazonicum' (Huber ex Ducke) barneby. *Australian Journal of Crop Science*, 13(5), 761-766.
- Lin, H. A., Coker, H. R., Park, S., Finlayson, S. A., Tfaily, M. M., Nagy, E. M., ... & Smith, A. P. 2024.** Aeroponic approach for nondestructive root exudate collection and simulation of variable water stress trialed on cotton (*Gossypium hirsutum*). *Scientific Reports*, 14(1), 28615.
- Marlow, T. R., & Harkess, R. L. 2025.** Using Cutting Immersion to Apply Rooting Hormone for Propagation of *Camellia japonica*. Honors Theses. 147. <https://scholarsjunction.msstate.edu/honorsthesis/147>
- Mirihagalla, M. K. P. N., & Fernando, K. M. C. 2020.** Effect of Aloe vera Gel for Inducing Rooting of Stem Cuttings and Air layering of Plants.
- Mueller, D. S., Li, S., Hartman, G. L., & Pedersen, W. L. 2002.** Use of aeroponic chambers and grafting to study partial resistance to *Fusarium solani* f. sp. *glycines* in soybean. *Plant disease*, 86(11), 1223-1226.
- Nogueira, M. R., Ferraz, M. V., Bezerra, A. K. D., Mazzini-Guedes, R. B., Costa, C. R. X., de Almeida, L. C. P., ... & Pivetta, K. F. L. 2018.** Indolbutyric acid and time of the year influence on rooting of chrysanthemum cuttings. *American Journal of Plant Sciences*, 9(3), 507-516.
- Nordstrom, A. C., Jacobs, F. A., & Eliasson, L. 1991.** Effect of exogenous indole-3-acetic acid and indole-3-butyric acid on internal levels of the respective auxins and their conjugation with aspartic acid during adventitious root formation in pea cuttings. *Plant physiology*, 96(3), 856-861.
- Oakes, A. D., Pilkey, H. C., & Powell, W. A. 2020.** Improving ex vitro rooting and acclimatization techniques for micropropagated American chestnut. *Journal of Environmental Horticulture*, 38(4), 149-157.
- Onteng-Darko, P. et al. 2017.** Growing Seed Yams in the Air: the Agronomic Performance of Two Aeroponics Systems Developed in Ghana. *Sustainable Agriculture Research*, v. 6, n. 3, p. 106-116. DOI:10.5539/sar.v6n3p106.
- Rasheed, A., Mahmood, A., Maqbool, R., Albaqami, M., Sher, A., Sattar, A., ... & Wu, Z. 2022.** Key insights to develop drought-resilient soybean: A review. *Journal of King Saud University-Science*, 34(5), 102089.

- Raza, M. A., Gul, H., Yang, F., Ahmed, M., & Yang, W. 2021.** Growth rate, dry matter accumulation, and partitioning in soybean (*Glycine max* L.) in response to defoliation under high-rainfall conditions. *Plants*, 10(8), 1497.
- Silva, F. M. D., Pereira, E. D. M., Val, B. H. P., Perecin, D., Mauro, A. O. D., & Unêda-Trevisoli, S. H. 2018.** Strategies to select soybean segregating populations with the goal of improving agronomic traits. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 40, e39324.
- Steffens, B., & Rasmussen, A. (2016).** The physiology of adventitious roots. *Plant physiology*, 170(2), 603-617.
- Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. 2017.** Fisiologia e desenvolvimento vegetal. Artmed Editora.
- Tang, L., Syed, A. U. A., Otho, A. R., Junejo, A. R., Tunio, M. H., Hao, L., ... & Channa, J. A. 2024.** Intelligent Rapid Asexual Propagation Technology—A Novel Aeroponics Propagation Approach. *Agronomy*, 14(10), 2289.
- Villafuerte, D. E., Angeles, E., Bayog, A., Duka, R., Meñoza, N. L., Sanchez, M. A., & De Jesus, R. 2022.** Root organogenesis induction in *Epipremnum aureum* stem cuttings with plant biostimulants and synthetic rooting hormone. *bioRxiv*, 2022-07.
- Wise, K., Selby-Pham, J., Simovich, T., & Gill, H. 2024.** A biostimulant complex comprising molasses, Aloe vera extract, and fish-hydrolysate enhances yield, aroma, and functional food value of strawberry fruit. *Advances in Horticultural Science*, 38(1), 47-62.
- Wootton-Beard, P. 2019.** Producing fodder crops using hydroponics. Farming Connect, 2019. 10 p.
- Xiong, D., Chen, J., Yu, T., Gao, W., Ling, X., Li, Y., ... & Huang, J. 2015.** SPAD-based leaf nitrogen estimation is impacted by environmental factors and crop leaf characteristics. *Scientific reports*, 5(1), 13389.
- Yang, M. H., Jahufer, M. Z., He, J., Dong, R., Hofmann, R., Siddique, K. H., & Li, F. M. 2020.** Effect of traditional soybean breeding on water use strategy in arid and semi-arid areas. *European Journal of Agronomy*, 120, 126128.
- Zhang, W., Lu, L. Y., Hu, L. Y., Cao, W., Sun, K., Sun, Q. B., ... & Dai, C. C. 2018.** Evidence for the involvement of auxin, ethylene and ROS signaling during primary root inhibition of *Arabidopsis* by the allelochemical benzoic acid. *Plant and Cell Physiology*, 59(9), 1889-1904.