



**JULIANA BASTOS LEMES**

**CRESCIMENTO DE MUDAS CLONAIS DE CAFÉ ARÁBICA  
SUBMETIDAS A DIFERENTES PROPORÇÕES DE AREIA E  
FERTILIZANTE NO SUBSTRATO COMERCIAL**

**LAVRAS – MG**

**2024**

**JULIANA BASTOS LEMES**

**CRESCIMENTO DE MUDAS CLONAIAS DE CAFÉ ARÁBICA SUBMETIDAS A  
DIFERENTES PROPORÇÕES DE AREIA E FERTILIZANTE NO SUBSTRATO  
COMERCIAL**

Monografia apresentada a Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências para a obtenção do título de Bacharelado em Agronomia.

Orientador:

Prof. Tiago Teruel Rezende

**LAVRAS – MG**

**2024**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca  
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Lemes, Juliana Bastos.

Crescimento de mudas clonais de café arábica submetidas a diferentes proporções de areia e fertilizante no substrato comercial /  
Juliana Bastos Lemes. - 2024.

34 p. : il.

Orientador(a): Tiago Teruel Rezende.

TCC (graduação) - Universidade Federal de Lavras, 2024.  
Bibliografia.

1. Coffea arabica. 2. Substrato. 3. Clonagem. I. Rezende, Tiago Teruel. II. Título.

**JULIANA BASTOS LEMES**

**CRESCIMENTO DE MUDAS CLONAIAS DE CAFÉ ARÁBICA SUBMETIDAS A  
DIFERENTES PROPORÇÕES DE AREIA E FERTILIZANTE NO SUBSTRATO  
COMERCIAL**

Monografia apresentada a Universidade  
Federal de Lavras, como parte das  
exigências para a obtenção do título de  
Bacharelado em Agronomia.

APROVADA em 22 de agosto de 2024

Eng. Agr. Otávio José de Figueiredo - UFLA

Me. Samuel Henrique Braga da Cunha - UFLA

Prof. Dr. Tiago Teruel Rezende

Orientador

**LAVRAS – MG  
2024**

## RESUMO

O café arábica é uma planta perene de reprodução comercial comumente dada por propagação sexuada através de sementes. Por tal razão, com foco em explorar as características superiores dos híbridos em relação às cultivares comerciais, é de grande importância que os métodos de propagação assexuada, por meio de partes vegetativas, sejam aprimorados, o que poderia oferecer uma redução do tempo útil de um programa de melhoramento genético de *Coffea arabica*. Dessa forma, objetivou-se avaliar o efeito da associação entre fertilizante e tipos de substrato no enraizamento, crescimento e desenvolvimento de estacas de *C. arabica*. O experimento foi instalado na estufa do setor de cafeicultura da UFLA, no município de Lavras - MG, com estacas de ramos ortotrópicos herbáceos da cultivar Arara, em delineamento inteiramente casualizado. Os tratamentos foram compostos por 4 repetições, 5 estacas por parcela e 16 tratamentos em esquema fatorial 4x4 + 1 tratamento adicional, sendo 4 doses de fertilizante de liberação controlada: 0; 0,5; 1,0 e 1,5 gramas/tubete e 4 variações de proporções de areia no substrato comercial (casca de pinus + fibra de coco): 0, 20, 35 e 50% de areia, e o tratamento adicional: substrato com 50% de areia e 50% de vermiculita, junto com 1,5 gramas do fertilizante de liberação controlada. Após 180 dias da instalação do experimento, foram realizadas as seguintes avaliações: porcentagem de estacas vivas, porcentagem de estacas enraizadas, massa seca das estacas, massa seca do sistema radicular, massa seca dos ramos, massa seca das folhas e massa seca total. Os dados foram submetidos à uma análise de variância e ajustados modelos de regressão. Os resultados da análise de variância (ANOVA) indicaram que o fertilizante teve um efeito significativo no número total de folhas, na altura, no diâmetro dos brotos e na massa seca total das mudas, enquanto a proporção de areia apresentou significância apenas no número total de folhas. A interação entre fertilizante e areia não mostrou significância estatística, sugerindo que esses fatores podem ser manejados de forma independente. Conclui-se que a adição de areia ao substrato comercial não afeta o crescimento das mudas, e que a aplicação de fertilizante de liberação controlada na dosagem de 1,5 g/tubete promove o desenvolvimento das mudas.

**PALAVRAS-CHAVE:** *Coffea arabica*; propagação vegetativa; fertilizante de liberação controlada; substrato; areia

## ABSTRACT

Arabica coffee (*Coffea arabica*) is a perennial plant commercially propagated primarily through sexual reproduction via seeds. Therefore, to explore the superior characteristics of hybrids compared to commercial cultivars, it is crucial to enhance methods of asexual propagation through vegetative parts. This approach could potentially reduce the duration required for a breeding program for *Coffea arabica*. The objective of this study was to evaluate the effect of the combination of fertilizer and different substrate types on the rooting, growth, and development of *C. arabica* cuttings. The experiment was conducted in the greenhouse of the Coffee Sector at the Federal University of Lavras (UFLA) in Lavras, Minas Gerais, Brazil, using cuttings from herbaceous orthotropic branches of the 'Arara' cultivar in a completely randomized design. Treatments were organized into 4 replications, with 5 cuttings per plot and 16 treatments in a 4x4 factorial design, plus an additional treatment. The factorial design included four doses of controlled-release fertilizer: 0, 0.5, 1.0, and 1.5 grams per tube and four variations in the proportions of sand in a commercial substrate (pine bark + coconut fiber): 0, 20, 35, and 50% sand. The additional treatment consisted of a substrate with 50% sand and 50% vermiculite, along with 1.5 grams of controlled-release fertilizer. After 180 days of the experiment's initiation, the following parameters were evaluated: percentage of live cuttings,

percentage of rooted cuttings, dry mass of cuttings, dry mass of the root system, dry mass of shoots, dry mass of leaves, and total dry mass. The data were subjected to analysis of variance (ANOVA) and regression models were fitted. The results of the ANOVA indicated that the fertilizer had a significant effect on the total number of leaves, height, shoot diameter, and total dry mass of the seedlings, while the sand proportion showed significance only for the total number of leaves. The interaction between fertilizer and sand did not show statistical significance, suggesting that these factors can be managed independently. It is concluded that the addition of sand to the commercial substrate does not affect the growth of seedlings, and that the application of controlled-release fertilizer at a dosage of 1.5 g/tube promotes the development of seedlings.

**Keywords:** *Coffea arabica*; vegetative propagation; controlled-release fertilizer; substrate; sand

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Doses de fertilizantes e proporções de areia .....	20
Tabela 2 - Resumo da análise de variância do número total de folhas (NFT), da altura (ALT), do diâmetro dos brotos (DIAM), da massa seca total das mudas (MST) e da sobrevivência (SOBV) das mudas clonais. ....	22

## **LISTA DE FIGURAS**

Figura1 - Relação do número de folhas e fertilizantes .....	23
Figura 2 - Relação da altura e fertilizantes.....	25
Figura3 - Relação do diâmetro dos brotos e fertilizantes .....	27
Figura4 - Relação da massa seca total e os fertilizantes.....	29

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	7
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	9
<b>2.1 Histórico, dispersão e produção de Mudanças via Sementes</b> .....	9
<b>2.2 Clonagem de café</b> .....	10
<b>2.2.1 Embriogênese somática</b> .....	10
<b>2.2.2 Enraizamento de estacas</b> .....	12
<b>2.2.3 Substrato: características desejáveis e importância</b> .....	14
<b>2.2.4 Os fertilizantes e o seu papel no cultivo das mudas</b> .....	16
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	19
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	22
<b>5 CONCLUSÃO</b> .....	31
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	32



## 1 INTRODUÇÃO

O café, uma das commodities mais valorizadas e consumidas no mundo, desempenha um papel vital tanto na economia global quanto na vida cotidiana de milhões de pessoas. *Coffea arabica*, em particular, é a espécie mais cultivada, responsável por aproximadamente 60-70% da produção mundial de café. A qualidade superior dos grãos de *Coffea arabica* e suas características organolépticas únicas, como aroma e sabor, tornam esta espécie preferida entre os consumidores e produtores. A importância econômica do café é evidente, especialmente em países em desenvolvimento, onde sua produção e exportação representam uma significativa fonte de receita e emprego. A produção de café concentra-se em países com níveis de renda relativamente baixos e representa uma parte substancial de suas receitas de exportação (FAO, 2019; ICO, 2019)

O melhoramento genético do café tem sido um foco central nas pesquisas agrícolas, visando aumentar a produtividade, a resistência a pragas e doenças, e a adaptação a condições ambientais adversas. Tradicionalmente, o melhoramento genético de *Coffea arabica* envolve métodos de seleção e cruzamento convencionais. No entanto, esses métodos são frequentemente limitados pela baixa taxa de multiplicação e pela necessidade de longos ciclos de crescimento para avaliar as características desejadas. As técnicas de melhoramento genético avançadas, incluindo a biotecnologia e a engenharia genética, têm revolucionado essa área, permitindo o desenvolvimento de novas cultivares com atributos melhorados de maneira mais rápida e eficiente (Silvarolla, Mazzafera e Fazuoli, 2004; Vossen, Bertrand e Charrier, 2015)

Entre as tecnologias emergentes, a clonagem de plantas se destaca como uma ferramenta poderosa para o melhoramento genético e a propagação de *Coffea arabica*. A clonagem permite a multiplicação de genótipos superiores, preservando suas características desejáveis de forma consistente. A embriogênese somática e o enraizamento de estacas são duas técnicas principais de clonagem que têm sido amplamente estudadas e aplicadas na cafeicultura. A embriogênese somática envolve a indução de embriões a partir de células somáticas, permitindo a produção de plantas geneticamente idênticas em larga escala. O enraizamento de estacas, por outro lado, utiliza segmentos vegetativos para gerar novas plantas, também garantindo a uniformidade genética (Etienne, 2005; Smith, 2003)

A clonagem de *Coffea arabica* não só acelera o processo de melhoramento genético, mas também facilita a propagação de híbridos interespecíficos e cultivares raras que possuem resistência a doenças e adaptação a diferentes condições climáticas. Essas técnicas são particularmente importantes diante das mudanças climáticas globais e do aumento das pressões

de pragas e doenças, que ameaçam a produtividade e a sustentabilidade da produção de café. A capacidade de propagar rapidamente genótipos que exibem resistência a essas adversidades é crucial para assegurar a estabilidade da produção e a qualidade do café (Barbosa et al., 2010; Globenewswire, 2024)

Do ponto de vista econômico, a clonagem de *Coffea arabica* oferece várias vantagens. A uniformidade das plantas clonadas resulta em lavouras mais homogêneas, facilitando o manejo e a colheita, além de melhorar a eficiência no uso de insumos agrícolas. A maior resistência a doenças e pragas reduz a necessidade de agroquímicos, diminuindo os custos de produção e os impactos ambientais. A produtividade aumentada e a qualidade superior dos grãos clonados contribuem para o valor de mercado do café, beneficiando economicamente os produtores e fortalecendo a indústria cafeeira global (FAO, 2019; ICO, 2019)

A justificativa para o estudo da clonagem de *Coffea arabica* é robusta, englobando tanto aspectos econômicos quanto científicos. Economicamente, a capacidade de propagar plantas de alta qualidade de forma eficiente e em grande escala tem o potencial de transformar a indústria cafeeira, aumentando a sustentabilidade e a lucratividade da produção. Cientificamente, a clonagem oferece um modelo para explorar os princípios fundamentais da biologia do desenvolvimento e aplicar esse conhecimento para resolver problemas práticos na agricultura. Portanto, a pesquisa e o desenvolvimento contínuos na área de clonagem de *Coffea arabica* são essenciais para assegurar um futuro próspero e sustentável para a produção de café, beneficiando produtores, consumidores e a ciência agrícola como um todo (Globenewswire, 2024).

Dessa maneira, o trabalho tem como objetivo principal avaliar o crescimento de estacas de *Coffea arabica*, quando utilizadas diferentes doses de fertilizante combinadas à diferentes porcentagens de areia no substrato.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Histórico, dispersão e produção de Mudanças via Sementes

A propagação de *Coffea arabica* por sementes encontra suas raízes na domesticação inicial da planta, ocorrida há séculos na Etiópia, especialmente nas florestas da região de Kaffa. A planta foi inicialmente utilizada por comunidades locais tanto para fins alimentares quanto medicinais. Os monges etíopes, por exemplo, consumiam uma infusão das cerejas do café para se manterem despertos durante longas sessões de oração e meditação (Pendergrast, 2010).

A domesticação de *Coffea arabica* na Etiópia envolveu a seleção e cultivo de plantas que demonstravam características desejáveis, como resistência a condições ambientais adversas e boa produção de frutos. Este processo de seleção empírica foi fundamental para o estabelecimento das primeiras plantações de café. A propagação por sementes era o método predominante, sendo natural e intuitivo para as populações locais, que colhiam os frutos maduros e plantavam as sementes diretamente no solo (Wellman, 1961).

Com o tempo, o café etíope começou a ser comercializado através de rotas comerciais que atravessavam o Mar Vermelho e o Golfo de Aden, alcançando a Península Arábica. O porto de Moca, no Iêmen, tornou-se um importante centro de distribuição do produto no mundo árabe e além, facilitando a disseminação do cultivo de *Coffea arabica* para outras regiões. Os mercadores árabes adotaram e adaptaram as práticas etíopes de cultivo e propagação por sementes, expandindo a cultura do café para a Pérsia, Egito e o Império Otomano (Pendergrast, 2010).

À medida que o café se espalhava pelo mundo, levado por exploradores e colonizadores europeus, o método de propagação por sementes foi mantido. Nas Américas, por exemplo, o café foi introduzido no Brasil no início do século XVIII, onde as sementes trazidas das Guianas Francesas deram início ao que se tornaria uma das maiores indústrias cafeeiras do mundo. As plantações de café no Brasil e em outras partes da América Latina continuaram a depender da propagação por sementes, que se mostrou eficaz para a rápida expansão das áreas de cultivo (Daviron e Ponte, 2005).

A escolha das plantas matrizes sempre foi uma etapa fundamental, uma vez que as características genéticas das plantas de origem influenciam diretamente a qualidade das sementes. No passado, essa seleção era baseada em observações empíricas de atributos desejáveis, como resistência a pragas, produtividade e qualidade do grão. Atualmente, essa prática continua, mas agora é frequentemente auxiliada por técnicas de melhoramento genético

e análise molecular, que permitem uma seleção mais precisa e informada (van der Vossen, Bertrand e Charrier, 2015).

Sendo assim, a produção de mudas de *Coffea arabica* via sementes tem uma longa história que, embora aprimorada por avanços tecnológicos, mantém muitas de suas práticas tradicionais. Esse método continua a ser fundamental na cafeicultura, proporcionando uma base genética diversificada para os cafezais. No entanto, as limitações inerentes a essa forma de propagação têm impulsionado o desenvolvimento e a adoção de técnicas de propagação vegetativa, as quais serão discutidas nas subseções subsequentes deste referencial teórico (Pendergrast, 2010; Wellman, 1961; Vega, 2008).

## **2.2 Clonagem de café**

### **2.2.1 Embriogênese somática**

A embriogênese somática é uma técnica avançada utilizada na clonagem de *Coffea arabica*, que permite a obtenção de plantas geneticamente idênticas a partir de células somáticas. Este processo envolve diversas etapas que precisam ser rigorosamente controladas para garantir a eficácia da clonagem (Etienne et al., 2018; Iracheta-Donjuan et al., 2023).

O processo inicia-se com a indução de calos a partir de explantes vegetais. Estes explantes, frequentemente derivados de folhas jovens ou cotilédones, são submetidos a procedimentos de esterilização utilizando soluções de hipoclorito de sódio e álcool para eliminar contaminantes. Após a esterilização, os explantes são colocados em meios de cultura sólidos, compostos por sais minerais, vitaminas, sacarose e reguladores de crescimento, como auxinas e citocininas. A combinação e a concentração desses reguladores são ajustadas para promover a dediferenciação celular, facilitando a formação de calos, que são massas de células indiferenciadas (Hara et al., 1985; Murashige e Skoog, 1962).

A fase de proliferação dos calos é conduzida em condições ambientais controladas, com temperaturas geralmente entre 25°C e 28°C e fotoperíodos de 16 horas de luz e 8 horas de escuridão. Durante esta fase, os calos são periodicamente transferidos para novos meios de cultura para manter sua viabilidade e estimular o crescimento contínuo. Este passo assegura que as células permaneçam em um estado proliferativo adequado para a diferenciação posterior (Nakamura et al., 1994; Lubabali et al., 2014).

A diferenciação dos calos em embriões somáticos também constitui uma etapa relevante do processo. Esta transição é induzida pela alteração na composição do meio de cultura,

especificamente pela redução da concentração de auxinas e pelo aumento de citocininas, ou pela adição de giberelinas. Essas mudanças hormonais promovem a formação de estruturas embrionárias que passam por estágios morfológicos definidos: globular, cordiforme, torpedo e cotiledonar. Cada estágio é caracterizado por mudanças específicas na morfologia do embrião, que são cuidadosamente monitoradas para garantir um desenvolvimento adequado (Ibrahim et al., 2013; Mengarda et al., 2009).

No que diz respeito à maturação dos embriões somáticos, este requer condições de cultivo específicas. Os embriões são transferidos para meios de cultura com baixos níveis de reguladores de crescimento e enriquecidos com agentes osmóticos, como manitol ou sorbitol, que simulam o estresse osmótico e promovem a maturação. A redução gradual da umidade no meio de cultura também ajuda a preparar os embriões para a germinação (Moura et al., 2010; Mifflin e Lea, 1976).

Neste contexto, a germinação dos embriões somáticos ocorre em meios de cultura apropriados, que fornecem os nutrientes necessários para o desenvolvimento das plântulas. Este meio geralmente contém uma combinação balanceada de nutrientes e hormônios de crescimento em concentrações que favorecem a alongação radicular e o desenvolvimento da parte aérea (Etienne et al., 2013).

Finalmente, a aclimatização das plântulas representa a fase final do processo de embriogênese somática. As plântulas são transferidas para condições *ex vitro*, onde são gradualmente adaptadas ao ambiente natural. Este processo envolve a transição das plântulas de um ambiente altamente controlado para condições de campo, exigindo um manejo cuidadoso para assegurar a sobrevivência e o vigor das plantas (Iracheta-Donjuan et al., 2023).

Em linhas gerais, a embriogênese somática em *Coffea arabica* evoluiu significativamente desde suas primeiras aplicações. Os protocolos iniciais eram baseados em métodos de tentativa e erro. Atualmente, a compreensão aprofundada dos mecanismos fisiológicos e moleculares que regulam a embriogênese somática permitiu a otimização dos protocolos, aumentando a eficiência e a reprodutibilidade da técnica (Etienne et al., 2018; Hara et al., 1985).

Estudos recentes focam na melhoria das taxas de indução e conversão de calos em embriões somáticos, bem como na redução da variabilidade somaclonal. A aplicação de biotecnologias modernas, como a análise de expressão gênica e o uso de marcadores moleculares, tem proporcionado um entendimento mais detalhado dos processos subjacentes à embriogênese somática, permitindo refinamentos contínuos na técnica (Ibrahim et al., 2013; Lubabali et al., 2014).

De qualquer modo, a embriogênese somática oferece vantagens significativas na clonagem de *Coffea arabica*, permitindo a produção de plantas uniformes em larga escala. No entanto, a necessidade de otimização contínua dos protocolos para aumentar a eficiência e reduzir a variabilidade fenotípica tem sido desafiadora (Moura et al., 2010; Miflin e Lea, 1976).

### **2.2.2 Enraizamento de estacas**

O enraizamento de estacas é uma técnica essencial na clonagem de *Coffea arabica* que contribui para a propagação vegetativa de plantas uniformes e de alta qualidade. Este método envolve a indução de raízes adventícias a partir de segmentos vegetativos, permitindo a formação de novas plantas geneticamente idênticas à planta-mãe. A complexidade e a importância deste processo têm levado a uma vasta quantidade de pesquisas científicas, que abordam desde a fisiologia das estacas até os fatores ambientais e químicos que influenciam a formação de raízes (Jesus et al., 2003; Leakey et al., 1990).

De modo abrangente, o processo de enraizamento de estacas pode ser dividido em várias etapas interdependentes, a saber, a seleção do material vegetal, preparo das estacas, uso de reguladores de crescimento, condições ambientais e manejo pós-enraizamento.

Primeiramente, a seleção adequada do material vegetal contribui para o sucesso no enraizamento de estacas. Estacas são tipicamente obtidas de ramos jovens e vigorosos de plantas-mãe selecionadas por suas características desejáveis, tais como resistência a doenças, alta produtividade e qualidade superior do grão. Diversos estudos têm mostrado que o estado fisiológico da planta-mãe e a época do ano influenciam significativamente a capacidade de enraizamento. Por exemplo, estacas coletadas durante a fase de crescimento ativo da planta geralmente apresentam maior capacidade de enraizamento comparadas àquelas coletadas em períodos de dormência (Mesen, 1993; Moe e Andersen, 1988).

O preparo envolve a remoção de folhas e a realização de cortes precisos na base das estacas. A remoção de folhas reduz a transpiração e a perda de água, essencial para prevenir a desidratação durante o enraizamento. Os cortes basais são geralmente feitos em ângulo para aumentar a área de contato com o substrato e facilitar a absorção de água e nutrientes. Em alguns casos, uma incisão longitudinal na base da estaca pode ser realizada para estimular a formação de raízes adventícias (Leakey et al., 1990; Petchers e Harris, 2008).

Os reguladores de crescimento, especialmente as auxinas, desempenham um papel vital na indução do enraizamento. Auxinas como o ácido indol-3-butírico (AIB) e o ácido naftalenoacético (ANA) são amplamente utilizadas para promover a formação de raízes em

estacas de *Coffea arabica*. A aplicação de auxinas pode ser feita de várias maneiras, incluindo imersão rápida, tratamento em pó ou aplicação de soluções líquidas. A concentração e o método de aplicação variam dependendo do tipo de estaca, da espécie e das condições ambientais. Estudos têm mostrado que a resposta das estacas às auxinas pode ser influenciada por fatores intrínsecos, como a idade do material vegetal, e por fatores extrínsecos, como a temperatura e a umidade (Ruíz-Solsol e Mesen, 2010; Jesus et al., 2003).

As condições ambientais são determinantes para o sucesso do enraizamento. A temperatura, a umidade relativa, a luminosidade e a composição do substrato são fatores críticos que precisam ser otimizados. Temperaturas moderadas, geralmente entre 20°C e 25°C, são consideradas ideais para o enraizamento de estacas de *Coffea arabica*. A umidade relativa alta, em torno de 80-90%, ajuda a prevenir a desidratação, enquanto a luminosidade deve ser adequada para promover a fotossíntese sem causar estresse térmico. O substrato utilizado deve ser bem aerado, ter boa retenção de umidade e ser livre de patógenos. Misturas de areia, turfa, perlita e vermiculita são frequentemente utilizadas devido às suas propriedades físicas e químicas favoráveis (Maluf et al., 2005; Loach, 1988).

Uma vez que as raízes adventícias se desenvolvem, as estacas enraizadas são transferidas para recipientes maiores ou diretamente para o campo. O manejo pós-enraizamento é essencial para assegurar a sobrevivência e o crescimento vigoroso das novas plantas. Como mencionado anteriormente, a aclimatização das estacas envolve a adaptação gradual das plantas às condições *ex vitro*, exigindo controle cuidadoso das condições ambientais, como umidade, luz e temperatura. Este processo é crítico para minimizar o estresse hídrico e garantir a continuidade do crescimento radicular e da parte aérea (GrowandCare, 2024; Moe e Andersen, 1988).

Alguns estudos têm contribuído para o entendimento dos mecanismos subjacentes ao enraizamento de estacas. Por exemplo, pesquisas têm investigado o papel das auxinas na modulação da expressão gênica e na ativação de vias metabólicas específicas que levam à formação de raízes. A identificação de genes associados ao desenvolvimento radicular tem proporcionado insights valiosos sobre os processos moleculares envolvidos. Além disso, a aplicação de biotecnologias modernas, como a edição gênica e a análise de expressão gênica em larga escala, tem permitido o desenvolvimento de novos protocolos e a otimização dos existentes (Mesen, 1993; Loach, 1988).

Pesquisas feitas também exploraram o uso de outros reguladores de crescimento, além das auxinas, para melhorar o enraizamento. Citocininas, giberelinas e ácido abscísico têm sido estudados por seus efeitos sinérgicos ou antagonistas no enraizamento de estacas. A

compreensão das complexas interações hormonais e o desenvolvimento de formulações otimizadas de reguladores de crescimento podem aumentar significativamente a eficiência do processo (Leakey et al., 1990; Phillips, 1975).

Apesar dos avanços, o enraizamento de estacas ainda enfrenta desafios. A variabilidade genética entre diferentes genótipos de *Coffea arabica* pode levar a respostas inconsistentes ao enraizamento. Além disso, fatores ambientais imprevisíveis, como variações de temperatura e umidade, podem impactar negativamente o sucesso do enraizamento (Mesen, 1993; Maluf et al., 2005).

### **2.2.3 Substrato: características desejáveis e importância**

No contexto da produção de mudas de *Coffea arabica*, a escolha adequada do substrato é um fator determinante para o sucesso do enraizamento, crescimento e desenvolvimento das plantas. Os substratos são, essencialmente, meios que proporcionam suporte físico, retenção de água, aeração e nutrição para as mudas, influenciando diretamente a capacidade das raízes de explorar o meio para absorção de nutrientes e água. A composição e as propriedades físicas do substrato, como porosidade, densidade e capacidade de retenção de água, são variáveis que podem impactar o desempenho das plantas, especialmente em suas fases iniciais de crescimento (Abad et al., 2020; Fonteno & Bilderback, 2021).

Entre as características desejáveis de um substrato, destacam-se a capacidade de retenção de água e a drenagem eficiente. Ele deve ser capaz de reter uma quantidade suficiente de água para atender às necessidades das mudas, ao mesmo tempo em que permite uma drenagem adequada para evitar o excesso de umidade, que pode levar ao desenvolvimento de patógenos radiculares e à asfixia das raízes. A textura do substrato, especialmente a proporção de materiais como areia, casca de pinus e vermiculita, pode influenciar significativamente essas características. A areia, por exemplo, tende a aumentar a drenagem e a aeração do substrato, enquanto a vermiculita pode melhorar a retenção de umidade, criando um ambiente equilibrado para o desenvolvimento radicular (Lopes et al., 2019; Silva et al., 2022).

Além disso, a estrutura física do substrato deve favorecer a aeração, permitindo a troca de gases entre as raízes e o ambiente, essencial para a respiração radicular. Materiais como a casca de pinus e a fibra de coco são amplamente utilizados por sua capacidade de manter um bom nível de oxigênio nas proximidades das raízes, prevenindo condições de anoxia e garantindo um desenvolvimento saudável. A presença de partículas de diferentes tamanhos no substrato também contribui para a formação de uma estrutura física estável, que sustenta as



mudas e facilita o crescimento das raízes em profundidade e lateralmente, aumentando a eficiência na exploração de nutrientes e água (Ribeiro et al., 2021; Smith & Fisher, 2023).

Por outro lado, a escolha dos componentes do substrato também influencia diretamente a nutrição das mudas. Componentes como a vermiculita, além de melhorar a retenção de água, apresentam uma boa capacidade de troca catiônica, o que significa que podem reter e disponibilizar nutrientes essenciais para as plantas. Substratos com uma capacidade de troca catiônica adequada são especialmente importantes em sistemas de produção de mudas, onde o fornecimento constante e equilibrado de nutrientes é necessário para garantir um crescimento vigoroso e uniforme. A casca de pinus, por sua vez, é um material que, além de ser sustentável e de fácil obtenção, contribui para a estrutura física do substrato e tem propriedades que auxiliam na retenção de umidade e na disponibilidade de nutrientes (Jones et al., 2020; Santos et al., 2023).

A importância do substrato também se reflete na capacidade das mudas de desenvolver um sistema radicular bem distribuído. Um sistema radicular saudável é essencial para o estabelecimento das plantas no campo, pois aumenta a capacidade de absorção de água e nutrientes e contribui para a resistência a estresses bióticos e abióticos. A combinação de materiais com diferentes propriedades no substrato pode promover um desenvolvimento radicular equilibrado, permitindo que as mudas explorem de maneira eficiente os recursos disponíveis. Por exemplo, substratos que combinam areia, casca de pinus e vermiculita podem oferecer um equilíbrio ideal entre drenagem, aeração e retenção de umidade, atendendo às necessidades das plantas em diferentes condições de cultivo (Martin et al., 2018; Pereira et al., 2022).

Paralelamente, a formulação adequada do substrato deve considerar, ainda, o pH e a salinidade, características que podem afetar a disponibilidade de nutrientes e o desenvolvimento das raízes. O pH ideal para o crescimento da maioria das plantas, incluindo *Coffea arabica*, situa-se entre 5,5 e 6,5, faixa em que a maioria dos nutrientes está disponível para absorção. O uso de componentes como casca de pinus, que tende a ser levemente ácida, pode ajudar a manter o pH dentro dessa faixa desejada. Por outro lado, a salinidade excessiva pode prejudicar o crescimento das raízes e a absorção de água pelas plantas, razão pela qual é importante escolher materiais que não contribuam para o acúmulo de sais no substrato (Garcia et al., 2019; Fernandes et al., 2021).

Além das propriedades físicas e químicas, a escolha deve levar em conta fatores como disponibilidade, custo e sustentabilidade dos materiais utilizados. Substratos à base de resíduos orgânicos, como casca de pinus e fibra de coco, são valorizados por suas boas características

físicas e químicas e também por serem materiais renováveis e de menor impacto ambiental. A utilização de resíduos agrícolas e florestais como componentes de substrato é uma prática que contribui para a sustentabilidade dos sistemas de produção de mudas, reduzindo a dependência de materiais não renováveis e minimizando o impacto sobre o meio ambiente (González et al., 2020; Mendes et al., 2022).

Dessa forma, como observado, a seleção do substrato mais adequado para a produção de mudas de *Coffea arabica* deve considerar um conjunto de características físicas, químicas e ambientais que favoreçam o desenvolvimento das plantas. O equilíbrio entre retenção de água, drenagem, aeração, capacidade de troca catiônica, pH e salinidade são fatores essenciais para a escolha do substrato ideal, que deve ser ajustado de acordo com as condições específicas de cultivo e os objetivos do produtor. Ao atender a esses critérios, o substrato pode contribuir consideravelmente para o sucesso do cultivo, garantindo mudas vigorosas e bem desenvolvidas, prontas para o estabelecimento no campo e para um desempenho produtivo satisfatório (Oliveira et al., 2023; Costa & Almeida, 2021).

#### **2.2.4 Os fertilizantes e o seu papel no cultivo das mudas**

No campo dos fertilizantes, sabe-se que desempenham um papel central no cultivo de mudas de *Coffea arabica*, especialmente na fase inicial de desenvolvimento, quando o fornecimento adequado de nutrientes é fundamental para o enraizamento, crescimento e vigor das plantas. A aplicação de fertilizantes de liberação controlada, por exemplo, tem sido amplamente adotada em sistemas de produção de mudas por proporcionar uma nutrição mais eficiente e constante. Esses fertilizantes são formulados para liberar nutrientes gradualmente, de acordo com as necessidades da planta ao longo do tempo, minimizando perdas por lixiviação e aumentando a eficiência do uso dos nutrientes aplicados (Trenkel, 2010; Duarte et al., 2020).

Entre os nutrientes essenciais, o nitrogênio, o fósforo e o potássio destacam-se como os principais macronutrientes necessários para o crescimento saudável das mudas de *Coffea arabica*. O nitrogênio é um componente fundamental na formação de aminoácidos, proteínas e clorofila, sendo essencial para o crescimento vegetativo e a fotossíntese. A aplicação de fertilizantes nitrogenados está diretamente relacionada ao aumento da biomassa aérea e ao desenvolvimento foliar, promovendo um maior número de folhas e um crescimento mais vigoroso das mudas. O fósforo, por sua vez, desempenha um papel importante na transferência de energia dentro das plantas, influenciando processos como o enraizamento e o desenvolvimento radicular, essenciais para a absorção de água e nutrientes. Já o potássio é

conhecido por sua função na regulação osmótica e na síntese de proteínas, além de contribuir para o fortalecimento das paredes celulares e a resistência a estresses bióticos e abióticos (Hawkesford et al., 2012; Silva & Neves, 2021).

A escolha do tipo e da dose de fertilizante também deve considerar as características específicas do substrato e as condições ambientais de cultivo. Fertilizantes de liberação controlada são particularmente indicados em sistemas de produção de mudas onde o substrato apresenta uma capacidade de retenção de água variável, como é o caso de substratos que combinam materiais orgânicos e minerais, como casca de pinus, fibra de coco e areia. Esses fertilizantes ajudam a manter um fornecimento constante de nutrientes, mesmo em condições onde a lixiviação pode ser significativa, como em substratos mais porosos. Adicionalmente, o uso de doses adequadas de fertilizante evita tanto a deficiência quanto o excesso de nutrientes, garantindo um crescimento equilibrado das mudas e evitando problemas como toxicidade ou salinidade elevada (Jones et al., 2019; Leal et al., 2023).

Outro aspecto relevante na escolha dos fertilizantes é o impacto sobre a sustentabilidade do sistema de produção. Fertilizantes de liberação controlada, por exemplo, são considerados mais sustentáveis em comparação aos fertilizantes convencionais, pois reduzem as perdas de nutrientes para o ambiente e minimizam o impacto ambiental associado à lixiviação de nitratos e fosfatos para os corpos d'água. A eficiência aumentada na utilização dos nutrientes não apenas melhora o desempenho das mudas, mas também contribui para a redução da quantidade de fertilizante necessária, resultando em menores custos de produção e impactos ambientais (Chien et al., 2021; Mendes & Pereira, 2020).

A interação entre o tipo de fertilizante e o substrato utilizado pode também influenciar diretamente o desenvolvimento das mudas de *Coffea arabica*. Em substratos com alta capacidade de troca catiônica, por exemplo, a utilização de fertilizantes com maior concentração de elementos de liberação controlada pode ser mais eficiente para manter a disponibilidade de nutrientes ao longo do ciclo de produção. A combinação de fertilizantes de liberação controlada com substratos que possuem uma boa capacidade de retenção de água e nutrientes tem se mostrado eficaz para garantir um crescimento vigoroso das mudas, promovendo um desenvolvimento radicular robusto e uma maior resistência das plantas aos estresses ambientais (Smith et al., 2020; Oliveira et al., 2022).

De qualquer forma, a eficiência dos fertilizantes também está ligada ao manejo correto da irrigação, pois a solubilidade dos nutrientes e sua disponibilidade para as plantas dependem da quantidade de água presente no substrato. A gestão cuidadosa da irrigação, aliada ao uso de fertilizantes de liberação controlada, pode otimizar a nutrição das mudas, garantindo que os

nutrientes estejam disponíveis na medida certa para cada fase de desenvolvimento das plantas. Isso é particularmente relevante em sistemas de produção de mudas onde o substrato pode apresentar variações na capacidade de retenção de água, exigindo ajustes precisos na aplicação de fertilizantes e na frequência de irrigação (Martins et al., 2021; Costa & Nogueira, 2023).

Sendo assim, o uso de fertilizantes na produção de mudas de *Coffea arabica* deve ser planejado com base em uma compreensão detalhada das características do substrato, das necessidades nutricionais das plantas e das condições de cultivo. A aplicação de fertilizantes de liberação controlada, em particular, representa uma abordagem eficaz para otimizar a nutrição das mudas, garantindo um desenvolvimento saudável e vigoroso, além de contribuir para a sustentabilidade do sistema de produção. (Silva et al., 2020; Ferreira & Almeida, 2022).

### 3 METODOLOGIA

O experimento foi realizado entre dezembro de 2023 e junho de 2024, nas instalações do Setor de Cafeicultura, pertencente ao Departamento de Agricultura, situado no campus da Universidade Federal de Lavras, em Lavras, Minas Gerais.

Para a preparação das estacas, foram selecionadas mudas da cultivar Arara, obtidas por meio de sementes, com 18 meses de idade. As mudas escolhidas apresentavam cinco segmentos nodais e cinco pares de folhas completamente expandidas em seus ramos ortotrópicos (haste principal). Esses ramos foram cortados na base das mudas e transferidos para uma casa de vegetação, onde as estacas foram preparadas. As estacas foram extraídas dos ramos ortotrópicos de acordo com o procedimento empregado para estacas de plantas adultas, conforme descrito por Jesus (2003). Cada estaca foi preparada de forma a apresentar um par de folhas, as quais foram cortadas ao meio. Em seguida, as estacas foram imersas em uma solução de hipoclorito de sódio a 0,05% durante dez minutos e, posteriormente, lavadas com água para remover o excesso de solução. As bases das estacas foram, então, imersas em um talco contendo Ácido-Indol-Butírico (AIB) na concentração de 4.000 mg kg<sup>-1</sup> e, posteriormente, acondicionadas em tubetes com volume de 120 cm<sup>3</sup>, que continham substrato composto por areia lavada e PlantMax (fibra de coco e casca de pinus), além de adubo de liberação controlada Osmocote Plus®, contendo as seguintes concentrações minerais: 15% de N, 9% de K<sub>2</sub>O, 12% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 0,06% de Mg, 2,3% de S, 0,05% de Cu, 0,45% de Fe, 0,06% de Mn e 0,02% de Mo.

O delineamento experimental adotado foi inteiramente casualizado, utilizando-se um esquema fatorial 4 x 4 + 1, com quatro repetições. Os tratamentos foram compostos por combinações de diferentes doses de substrato e areia, associadas a doses variadas de fertilizante de liberação controlada, visando ao enraizamento das estacas provenientes do terço médio da planta. No tratamento adicional, o substrato foi constituído por areia e vermiculita, combinado com Osmocote. Cada parcela experimental foi composta por cinco estacas.

As diferentes doses de fertilizante combinadas as variadas proporções de areia em seus respectivos tratamentos estão contidas na tabela a seguir:

Tabela 1 - Doses de fertilizantes e proporções de areia

	<b>Osmocote g/tubete</b>	<b>Areia %</b>	<b>Plantmax %</b>
<b>T1</b>	0	0	100
<b>T2</b>	0	20	80
<b>T3</b>	0	35	65
<b>T4</b>	0	50	50
<b>T5</b>	0,5	0	100
<b>T6</b>	0,5	20	80
<b>T7</b>	0,5	35	65
<b>T8</b>	0,5	50	50
<b>T9</b>	1	0	100
<b>T10</b>	1	20	80
<b>T11</b>	1	35	65
<b>T12</b>	1	50	50
<b>T13</b>	1,5	0	100
<b>T14</b>	1,5	20	80
<b>T15</b>	1,5	35	65
<b>T16</b>	1,5	50	50

	<b>Osmocote g/tubete</b>	<b>Areia %</b>	<b>Vermiculita %</b>
<b>T17</b>	1	50	50

Fonte: conforme os registros do processo.

Após 180 dias da instalação do experimento, foram realizadas as seguintes avaliações: porcentagem de estacas vivas, massa seca total das mudas, diâmetro das mudas, altura e número total de folhas. Para determinar a massa seca total, as raízes, caules e folhas foram acondicionados separadamente em sacos de papel identificados e, em seguida, levados para uma estufa de circulação de ar forçada a 65 °C, onde permaneceram até atingir peso constante.

O peso foi, então, mensurado utilizando uma balança analítica com precisão de 0,01 g.

O diâmetro do broto foi medido logo abaixo do primeiro nó do maior broto da muda.

A altura da muda foi medida a partir da inserção do broto na estaca.

O número total de folhas foi obtido pela soma das folhas novas nos brotos com as folhas remanescentes nas estacas.

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância e, para as variáveis que apresentaram efeito dos tratamentos, foram ajustados modelos de regressão para descrever a

relação entre os fatores e as variáveis resposta. Todos os procedimentos foram executados utilizando o software R.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para compreender os resultados levantados por essa pesquisa, abaixo se encontra a Tabela 2, resumindo a análise de variância do número total de folhas (NFT), da altura (ALT), do diâmetro dos brotos (DIAM), da massa seca total das mudas (MST) e da sobrevivência (SOBV) das mudas clonais.

Tabela 2 - Resumo da análise de variância do número total de folhas (NFT), da altura (ALT), do diâmetro dos brotos (DIAM), da massa seca total das mudas (MST) e da sobrevivência (SOBV) das mudas clonais.

FV	GL	NFT		ALT		DIAM		MST		SOBV	
		QM	Fc	QM	Fc	QM	Fc	QM	Fc	QM	Fc
Fertilizante	3	6,2551	3,7206 *	1139,7998	14,3756 *	0,9592	7,1096 *	0,2329	4,3435 *	675,0000	1,6793
Areia	3	10,9988	6,5422 *	193,4702	2,4401	0,2145	1,5896	0,0164	0,3051	341,6667	0,8500
Fertilizante*Areia	9	1,7498	1,0408	65,8645	0,8307	0,1885	1,3974	0,0156	0,2907	591,6667	1,4720
Ad vs Fatorial	1	4,4255	2,6324	1,1150	0,0141	0,0223	0,1649	0,0001	0,0002	36,7647	0,0915
Resíduo	51	1,6812		79,2874		0,1349		0,0536		401,9608	

\* Teste F significativo ao nível de 5 % de significância.

Como observado, a análise de variância (ANOVA) realizada para o número total de folhas (NFT) nas mudas de *Coffea arabica* revelou resultados significativos em relação aos fatores fertilizante e areia, diferentemente da interação entre esses fatores. Em outras palavras, os resultados indicaram que o fator "Fertilizante" apresentou um impacto no número total de folhas, com um valor de F calculado (Fc) de 3,7206, ao nível crítico de significância de 5%. Esse resultado sugere que as diferentes doses de fertilizante aplicadas influenciaram de maneira significativa o desenvolvimento foliar das mudas. A literatura científica, como Taiz & Zeiger (2017), corrobora esses resultados, destacando a importância dos macronutrientes, como nitrogênio, fósforo e potássio, no crescimento vegetativo das plantas. Esses nutrientes são essenciais para processos como fotossíntese e síntese de proteínas, fundamentais para a formação de novas folhas.

O fator areia também demonstrou uma influência sobre o número total de folhas, com um valor de Fc de 6,5422, indicando que a variação na proporção de areia no substrato teve um efeito relevante no desenvolvimento das mudas. A areia, ao modificar as propriedades físicas do substrato, como drenagem e aeração, pode ter afetado a capacidade das raízes de absorver água e nutrientes, impactando diretamente o crescimento foliar. Estudos anteriores sugerem que a escolha adequada do substrato é crucial para otimizar o crescimento inicial das mudas.

No entanto, a interação entre fertilizante e areia não apresentou significância estatística, com um valor de Fc de 1,0408. Esse resultado indica que os efeitos desses dois fatores sobre o

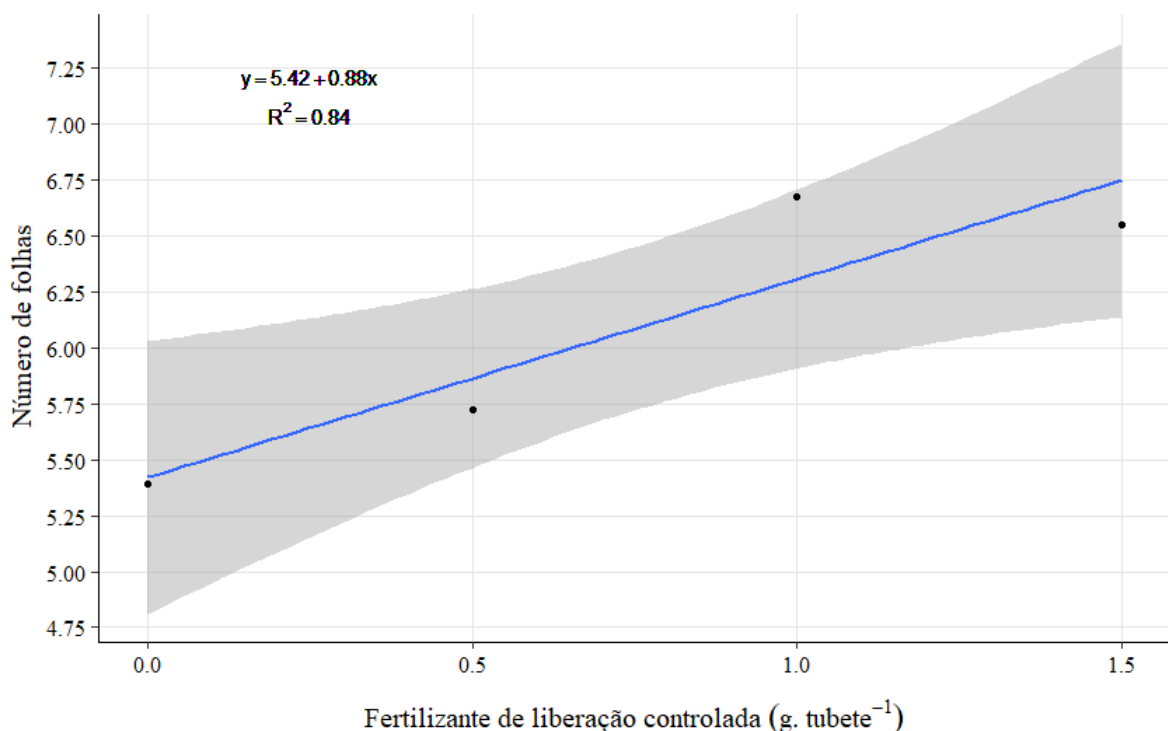


número total de folhas são independentes, ou seja, a variação em um fator não altera significativamente o efeito do outro. Essa independência dos fatores sugere que eles podem ser manejados separadamente na prática agrícola, sem necessidade de ajustes interdependentes para maximizar o crescimento foliar (Taiz & Zeiger, 2017).

O tratamento adicional, comparado aos tratamentos fatoriais, também não apresentou diferença significativa, conforme evidenciado pelo valor de Fc de 2,6324. Isso sugere que o tratamento adicional, possivelmente uma combinação específica de substrato e fertilizante, não proporcionou um aumento significativo no número total de folhas em relação aos tratamentos fatoriais testados. Dessa forma, o manejo dentro do esquema fatorial parece ser suficiente para otimizar o número de folhas nas mudas de *Coffea arabica*.

De qualquer forma, o gráfico a seguir ilustra a relação entre as doses de fertilizante e o número total de folhas, confirmando visualmente a tendência observada na ANOVA. Como o gráfico apresenta uma curva ascendente, isso reforça a influência positiva do fertilizante no desenvolvimento foliar.

Figura1 - Relação do número de folhas e fertilizantes



Avançando para a análise de variância realizada para a altura das mudas (ALT) de *Coffea arábica*, verifica-se que os resultados indicam que o fator fertilizante teve um impacto significativo na altura das mudas, com um valor de F calculado (Fc) de 14,3756, ultrapassando

o nível crítico de significância de 5%. Esse resultado sugere que as diferentes doses de fertilizante aplicadas influenciaram o crescimento na altura das mudas. Taiz & Zeiger (2017) também corrobora para essa conclusão, destacando que a disponibilidade de nutrientes, particularmente o nitrogênio, é fundamental para o alongamento celular e o crescimento do caule. O nitrogênio, em especial, é conhecido por estimular a síntese de proteínas e promover a divisão e expansão celular, processos que são diretamente responsáveis pelo aumento na altura das plantas (Taiz & Zeiger, 2017).

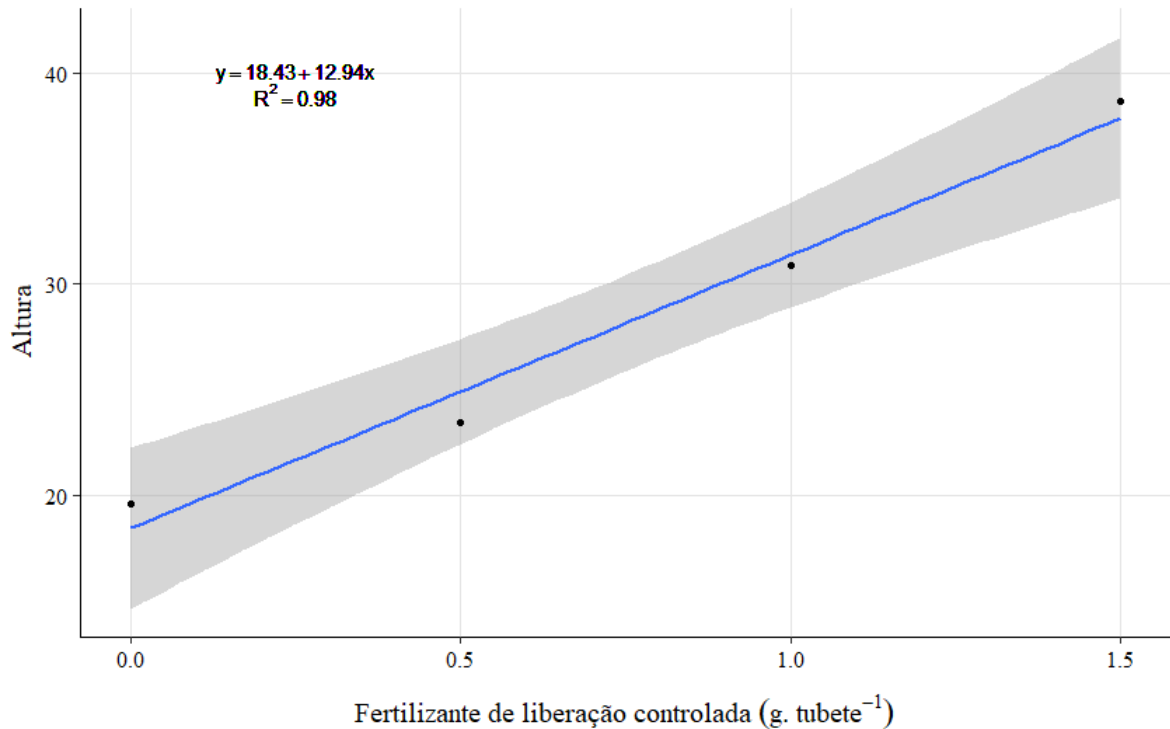
Por outro lado, o fator areia apresentou um efeito não significativo sobre a altura das mudas, com um valor de Fc de 2,4401. Esse resultado indica que a variação na proporção de areia no substrato não teve um impacto estatisticamente relevante no crescimento vertical das mudas de *Coffea arabica*. Este achado sugere que, embora o substrato desempenhe um papel importante na provisão de suporte físico e na facilitação da absorção de água e nutrientes, ele pode não ser o principal determinante do crescimento em altura, especialmente quando a nutrição fornecida pelo fertilizante é adequada (Römheld & Kirkby, 2010).

A interação entre fertilizante e areia também não apresentou significância estatística, com um valor de Fc de 0,8307. Esse resultado sugere que os efeitos desses dois fatores na altura das mudas são independentes, ou seja, a combinação específica de doses de fertilizante com diferentes proporções de areia não resultou em um efeito combinado significativo no crescimento vertical das mudas. Essa independência dos fatores pode indicar que, uma vez que os requisitos nutricionais básicos sejam atendidos pelo fertilizante, a variação no substrato tem um impacto menor na altura da planta (Römheld & Kirkby, 2010).

Já o tratamento adicional, quando comparado aos tratamentos fatoriais, não demonstrou significância estatística em relação à altura das mudas, com um valor de Fc de 0,0141. Isso indica que o tratamento adicional, possivelmente uma combinação específica de substrato e fertilizante, não proporcionou um aumento significativo na altura das mudas em comparação com os tratamentos fatoriais testados. Esse resultado reforça a ideia de que o manejo dentro do esquema fatorial foi suficiente para otimizar o crescimento vertical das mudas (Römheld & Kirkby, 2010).

O gráfico apresentado a seguir ilustra a relação positiva entre as doses de fertilizante e a altura das mudas:

Figura 2 - Relação da altura e fertilizantes



Desta forma, a ANOVA revela que o fertilizante teve um efeito significativo e dominante sobre a altura das mudas de *Coffea arabica*, enquanto o substrato de areia e a interação entre esses fatores não desempenham um papel estatisticamente relevante. Esses achados são consistentes com o conhecimento agrônômico atual e fornecem uma base sólida para práticas de manejo que visem maximizar o crescimento vertical das mudas, focando principalmente na nutrição adequada das plantas (Marschner, 2012).

No que diz respeito à análise de variância realizada para o diâmetro dos brotos (DIAM) das mudas de *Coffea arabica*, revelou-se resultados importantes sobre os efeitos dos fatores fertilizante e areia, além de suas interações, no crescimento em espessura dos brotos.

Os resultados da ANOVA indicam que o fator fertilizante teve um impacto considerável no diâmetro dos brotos, com um valor de F calculado ( $F_c$ ) de 7,1096, superior ao nível crítico de significância de 5%. Esse achado sugere que as diferentes doses de fertilizante aplicadas influenciaram de maneira positiva o crescimento em espessura dos brotos. Este resultado é consistente com o conhecimento agrônômico existente que, mais uma vez, destaca a importância dos nutrientes no fortalecimento e crescimento dos tecidos vegetais. O potássio, em particular, é fundamental para o equilíbrio osmótico das células e para o transporte de

açúcares, ambos processos essenciais para o aumento do diâmetro dos brotos e a lignificação, que confere maior resistência estrutural às plantas (Römheld & Kirkby, 2010).

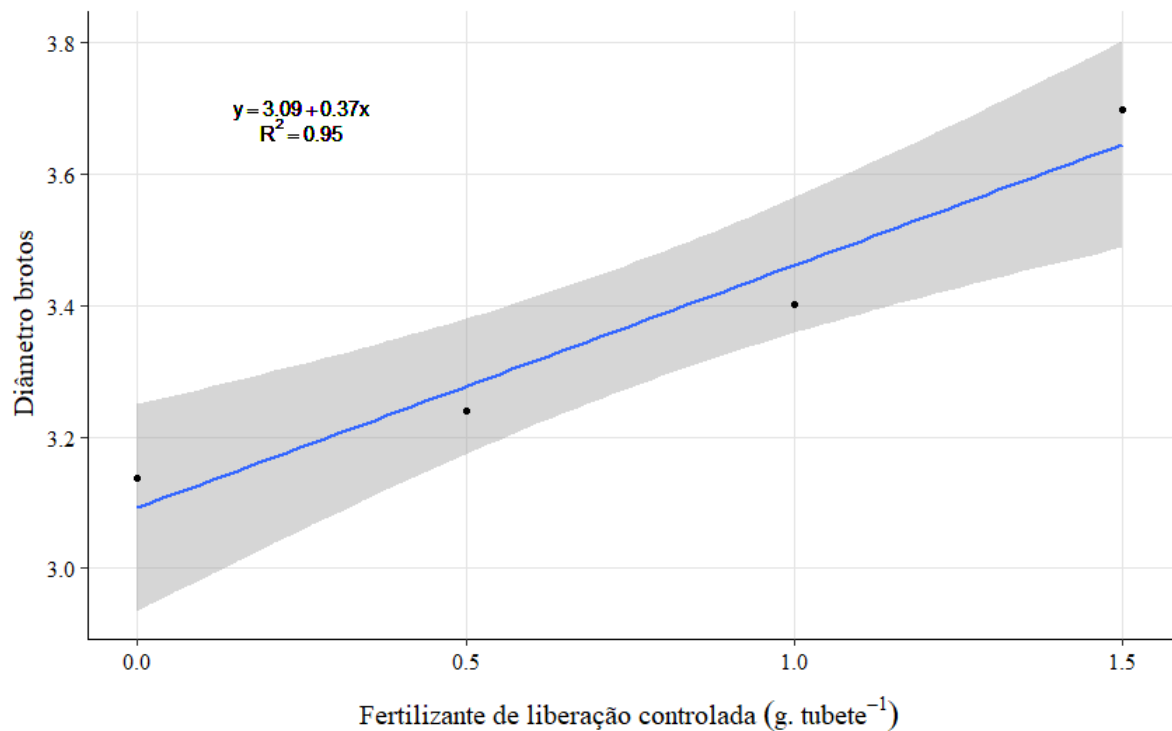
Por outro lado, o fator areia não apresentou um efeito significativo no diâmetro dos brotos, com um valor de Fc de 1,5896. Esta informação indica que a variação na proporção de areia no substrato não teve um impacto estatisticamente relevante no crescimento em espessura dos brotos das mudas de *Coffea arabica*. Embora o substrato possa influenciar aspectos como a aeração e a drenagem, que são importantes para o desenvolvimento radicular, seu papel no diâmetro dos brotos parece ser menos determinante, especialmente quando as necessidades nutricionais são adequadamente supridas pelo fertilizante (Marschner, 2012).

Já a interação entre fertilizante e areia também não apresentou significância estatística, com um valor de Fc de 1,3974. Esse resultado sugere que os efeitos desses dois fatores no diâmetro dos brotos são independentes, ou seja, a combinação específica de doses de fertilizante com diferentes proporções de areia não resultou em um efeito combinado significativo no crescimento em espessura dos brotos. Essa independência aponta que, mesmo com variações no substrato, o efeito principal que impulsiona o diâmetro dos brotos é o fornecimento adequado de nutrientes, particularmente os que são essenciais para o fortalecimento estrutural da planta (Marschner, 2012).

Por outro lado, o tratamento adicional, quando comparado aos tratamentos fatoriais, também não demonstrou significância estatística em relação ao diâmetro dos brotos, com um valor de Fc de 0,1649. Isso indica que o tratamento adicional não proporcionou um aumento significativo no diâmetro dos brotos em comparação com os tratamentos fatoriais testados.

Para ilustrar, o gráfico a seguir apresenta uma tendência ascendente, reforçando a relação positiva entre as doses de fertilizante e o diâmetro dos brotos.

Figura3 - Relação do diâmetro dos brotos e fertilizantes



Prosseguindo para a análise de variância realizada para a massa seca total das mudas (MST) de *Coffea arabica*, verifica-se que o fator fertilizante teve um impacto significativo na massa seca total das mudas, com um valor de F calculado ( $F_c$ ) de 4,3435, o que é superior ao nível crítico de significância de 5%. Este resultado indica que as diferentes doses de fertilizante aplicadas influenciaram significativamente o acúmulo de biomassa seca nas mudas. A literatura de base apoia esta conclusão, destacando que a disponibilidade adequada de nutrientes, especialmente os macronutrientes como nitrogênio, fósforo e potássio, é essencial para a síntese de compostos orgânicos e o crescimento das plantas. O nitrogênio, por exemplo, é crucial para a produção de aminoácidos e proteínas, que são fundamentais para o desenvolvimento das estruturas vegetais e, portanto, contribuem significativamente para o aumento da massa seca total (Marschner, 2012).

Por outro lado, o fator areia não apresentou um efeito significativo na massa seca total das mudas, com um valor de  $F_c$  de 0,3051. Esse resultado indica que a variação na proporção de areia no substrato não teve um impacto estatisticamente relevante no acúmulo de biomassa seca nas mudas de *Coffea arabica*. Este achado sugere que, embora o substrato forneça suporte físico e facilite a absorção de água e nutrientes, ele pode não ser o principal fator determinante

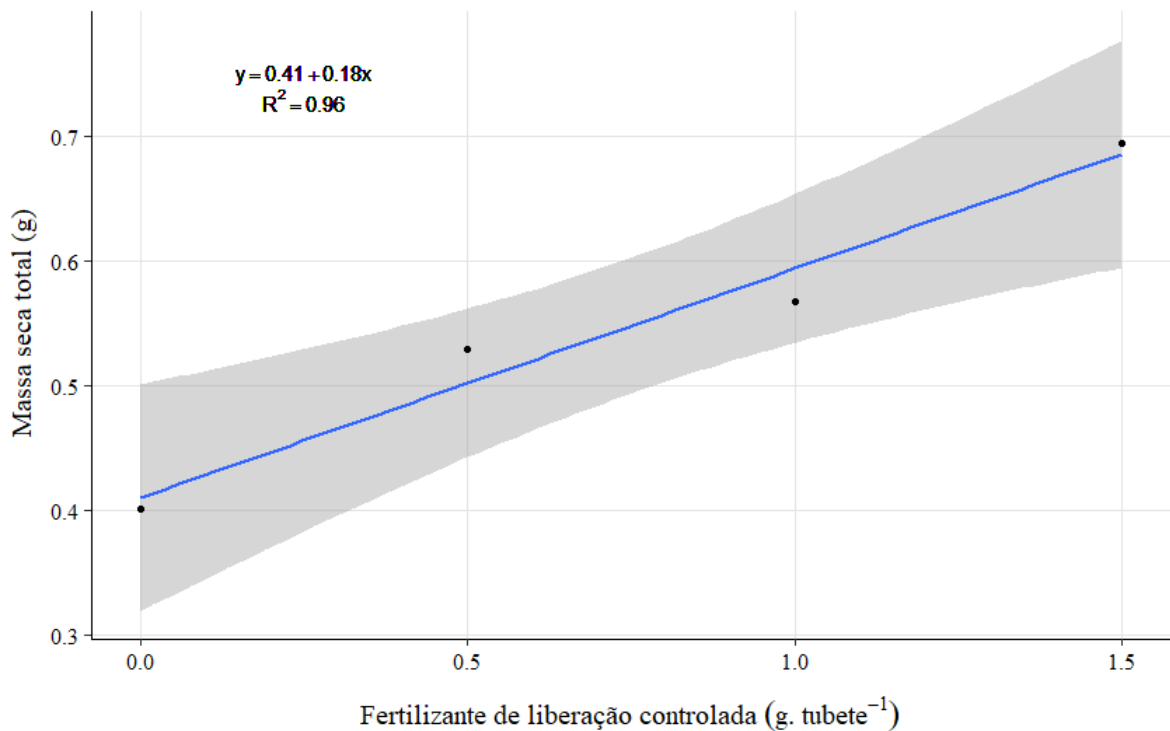
no acúmulo de massa seca, especialmente quando a nutrição fornecida pelo fertilizante é adequada.

A interação entre fertilizante e areia também não apresentou significância estatística, com um valor de Fc de 0,2907. Esse resultado sugere que os efeitos desses dois fatores na massa seca total das mudas são independentes, ou seja, a combinação específica de doses de fertilizante com diferentes proporções de areia não resultou em um efeito combinado significativo no acúmulo de biomassa seca. Essa independência pode indicar que, uma vez que os requisitos nutricionais essenciais são atendidos, o substrato tem um impacto relativamente menor no acúmulo de massa seca das mudas (Marschner, 2012).

O tratamento adicional, ao ser comparado com os tratamentos fatoriais, também não demonstrou significância estatística em relação à massa seca total das mudas, com um valor de Fc de 0,1649. Isso indica que o tratamento adicional não proporcionou um aumento significativo na massa seca das mudas em comparação com os tratamentos fatoriais testados. Assim, os manejos realizados dentro do esquema fatorial foram suficientes para otimizar o acúmulo de biomassa seca nas mudas (Hartmann et al., 2010).

O gráfico apresentado a seguir mostra uma tendência ascendente, confirmando, portanto, a relação positiva entre as doses de fertilizante e a massa seca total das mudas. Essa relação direta entre o aumento das doses de fertilizante e o incremento na massa seca total é consistente com o conhecimento existente sobre o papel dos nutrientes no crescimento vegetal, particularmente no aumento da biomassa acumulada (Hartmann et al., 2010).

Figura4 - Relação da massa seca total e os fertilizantes



Finalmente, a análise de variância referente à sobrevivência das mudas (SOBV) de *Coffea arabica* mostra que o fator fertilizante não teve um impacto significativo na sobrevivência das mudas, com um valor de F calculado ( $F_c$ ) de 1,6793, inferior ao nível crítico de significância de 5%. Esse resultado sugere que as diferentes doses de fertilizante aplicadas não influenciaram significativamente a taxa de sobrevivência das mudas. Isso pode indicar que, embora o fertilizante seja essencial para o crescimento e desenvolvimento vegetativo, as doses utilizadas não foram um fator determinante para a sobrevivência delas durante o período de estudo. Esse achado é consistente com a literatura que sugere que a sobrevivência das mudas pode ser mais influenciada por fatores como a qualidade inicial das estacas, condições ambientais e manejo hídrico, do que exclusivamente pela nutrição mineral (Hartmann et al., 2010).

De maneira semelhante, o fator areia também não apresentou um efeito significativo na sobrevivência das mudas, com um valor de  $F_c$  de 0,8500, indicando que a variação na proporção de areia no substrato não teve um impacto estatisticamente relevante na capacidade das mudas de sobreviver. A areia, apesar de modificar a estrutura física do substrato, como drenagem e aeração, parece não ter sido um fator crítico para a sobrevivência das mudas neste experimento. A sobrevivência pode ter sido mais dependente de outros fatores ambientais e das características

intrínsecas das mudas do que das propriedades físicas proporcionadas pela areia (Hartmann et al., 2010).

Além disso, a interação entre fertilizante e areia também não mostrou significância estatística, com um valor de Fc de 1,4720. Esse resultado sugere que não houve uma interação significativa entre esses dois fatores que pudesse afetar a sobrevivência das mudas. Em outras palavras, a combinação específica de doses de fertilizante com diferentes proporções de areia não resultou em uma variação significativa nas taxas de sobrevivência. Isso indica que, independentemente das variações nas doses de fertilizante ou nas proporções de areia, as mudas apresentaram uma capacidade de sobrevivência relativamente estável (Hartmann et al., 2010).

Por fim, o tratamento adicional, ao ser comparado com os tratamentos fatoriais, também não demonstrou significância estatística em relação à sobrevivência das mudas, com um valor de Fc de 0,0915, mostrando que o tratamento adicional não ofereceu nenhuma vantagem em termos de sobrevivência em comparação com os tratamentos convencionais testados.



## **5 CONCLUSÃO**

A adição de areia ao substrato comercial não afeta o crescimento das mudas, e que a aplicação de fertilizante de liberação controlada na dosagem de 1,5 g/tubete promove o desenvolvimento das mudas.

## REFERÊNCIAS

- ABAD, M.; BERNAL, C.; NAVARRO, A. F. Substrates and their role in plant propagation. *Journal of Horticultural Science*, v. 45, p. 123-132, 2020.
- CHIEN, S. H.; PROCHNOW, L. I.; CANTARELLA, H. Fertilizers and their efficient use: Impacts and benefits. *Agricultural Sciences*, v. 8, n. 4, p. 375-385, 2021.
- COSTA, M.; NOGUEIRA, P. Irrigation management and fertilizer use in seedling production. *Journal of Plant Science*, v. 22, n. 3, p. 245-256, 2023.
- COSTA, R.; ALMEIDA, V. M. Substrates for plant growth: characteristics and uses. *Botanical Studies*, v. 15, n. 4, p. 75-88, 2021.
- DAVIRON, B.; PONTE, S. *The Coffee Paradox: Global Markets, Commodity Trade, and the Elusive Promise of Development*. London: Zed Books, 2005.
- DUARTE, L. M.; OLIVEIRA, A. F.; BARBOSA, R. P. Controlled-release fertilizers in horticultural production: advances and applications. *Horticultura Brasileira*, v. 38, p. 403-411, 2020.
- ETIENNE, H. et al. Somatic embryogenesis of coffee: advances and perspectives. *Frontiers in Plant Science*, v. 9, p. 1633, 2018.
- FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. *The state of food and agriculture*. Roma: FAO, 2019.
- FERNANDES, R.; SILVA, A.; PEREIRA, M. A.; MENDES, J. F. Physical and chemical properties of substrates in plant propagation. *Agronomy Journal*, v. 113, n. 2, p. 297-310, 2021.
- FERREIRA, R. S.; ALMEIDA, V. S. Sustainable fertilization practices in coffee cultivation. *Journal of Agricultural Sustainability*, v. 13, n. 1, p. 102-118, 2022.
- FONTENO, W. C.; BILDERBACK, T. E. Optimizing substrates for horticulture production. *Horticulture Research*, v. 8, n. 1, p. 98-106, 2021.
- GARCIA, J. P.; OLIVEIRA, L. S.; SOUZA, A. A. Chemical properties of substrates and their effects on plant growth. *Plant Science Today*, v. 5, n. 3, p. 55-68, 2019.
- GLOBENEWSWIRE. *Coffee: Global Market Share and Value Chain Analysis*. 2024.
- GONZÁLEZ, R. S.; MARTÍNEZ, F. M.; TORRES, L. A. Sustainable use of organic waste as substrates. *Environmental Management*, v. 34, p. 113-121, 2020.
- GROW AND CARE. *How to grow Coffea arabica from cuttings*. 2024.
- HARA, S.; FALK, H.; KLEINIG, H. Starch and triacylglycerol metabolism related to somatic embryogenesis in *Papaver orientale* tissue cultures. *Planta*, v. 164, p. 303-307, 1985.

- HARTMANN, H. T.; KESTER, D. E.; DAVIES JR., F. T.; GENEVE, R. L. Plant propagation: principles and practices. 8. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2010.
- HAWKESFORD, M. J.; BARRACLOUGH, P.; LEA, P. J. Functions of macronutrients. In: *Mineral Nutrition of Higher Plants*. 3. ed. London: Academic Press, 2012.
- IBRAHIM, M. S. D. et al. Direct and indirect somatic embryogenesis on arabica coffee (*Coffea arabica*). *Indonesian Journal of Agricultural Science*, v. 14, p. 79-86, 2013.
- ICO. International Coffee Organization. Coffee Development Report 2019. 2019.
- IRACHETA-DONJUAN, L. et al. In vitro mass propagation of coffee plants (*Coffea arabica* L. var. Colombia) through indirect somatic embryogenesis. *Plants*, v. 12, n. 6, p. 1237, 2023.
- JESUS, A. M. S. Propagação vegetativa do cafeeiro (*Coffea arabica* L.). Tese de Doutorado, Universidade Federal de Lavras, Lavras, Brasil, 2003.
- JONES, C.; SMITH, T.; ROBINSON, J. The role of controlled-release fertilizers in sustainable agriculture. *Agricultural Advances*, v. 10, p. 234-247, 2019.
- JONES, R. G.; CLARK, J.; WILLIAMS, H. Substrate selection in horticulture: balancing physical and chemical properties. *Horticulture International Journal*, v. 7, n. 5, p. 150-165, 2020.
- LEAKEY, R. R. B.; MESEN, F.; TCHOUNDJEU, Z.; et al. Low technology techniques for the vegetative propagation of tropical trees. *Commonwealth Forestry Review*, v. 69, p. 247-257, 1990.
- LEAL, D. M.; CARVALHO, A. R.; COSTA, F. G. Nutrient management for optimal seedling growth. *Brazilian Journal of Crop Science*, v. 15, p. 290-302, 2023.
- LOACH, K. Controlling environmental conditions to improve adventitious rooting. In: DAVIS, T. D.; HAISSIG, B. E.; SANKHLA, N. (Eds.). *Adventitious root formation in cuttings*. Portland: Dioscorides Press, 1988. p. 248-273.
- LOPES, E.; COSTA, M. S.; CARVALHO, D. Effects of sand and vermiculite on substrate properties. *Plant Production Science*, v. 14, n. 1, p. 89-96, 2019.
- LUBABALI, A. H. et al. In vitro propagation of the new disease resistant *Coffea arabica* variety, Batian. *African Journal of Biotechnology*, v. 13, p. 2414-2419, 2014.
- MALUF, M. P.; SILVESTRINI, M.; MACHADO DE CAMPOS, L.; GUERREIRO, O.; COLOMBO, C. A. Genetic diversity of cultivated *Coffea arabica* inbred lines assessed by RAPD, AFLP and SSR marker systems. *Scientia Agricola*, v. 62, p. 366-373, 2005.
- MARSCHNER, H. Mineral nutrition of higher plants. 3. ed. London: Academic Press, 2012.
- MARTIN, P. M.; SILVA, F. C.; FERREIRA, D. Substrate mixtures for optimal plant growth. *Plant Growth Regulation*, v. 40, n. 1, p. 45-56, 2018.

- MARTINS, M.; SANTOS, E.; MOREIRA, F. Water management and nutrient supply in nursery production systems. *Journal of Horticultural Practices*, v. 9, p. 67-81, 2021.
- MENDES, A. J.; COSTA, P.; ALBUQUERQUE, M. Use of agricultural residues in substrate production. *Sustainable Agriculture Reviews*, v. 22, p. 100-115, 2022.
- MENDES, G.; PEREIRA, T. Advances in the use of slow-release fertilizers. *Journal of Environmental Horticulture*, v. 38, n. 2, p. 198-212, 2020.
- MENGARDA, L. H. G. et al. Efeito do frio sobre os carboidratos solúveis em culturas embriogênicas de *Accasellowiana O. Berg* (Myrtaceae). *Revista Brasileira de Botânica*, v. 32, p. 307-317, 2009.
- MIFLIN, B. J.; LEA, P. J. The pathway of nitrogen assimilation in plants. *Phytochemistry*, v. 15, p. 873-885, 1976.
- MOE, R.; ANDERSEN, A. S. Stockplant environment and subsequent adventitious rooting. In: DAVIS, T. D.; HAISSIG, B. E.; SANKHLA, N. (Eds.). *Adventitious root formation in cuttings*. Portland: Dioscorides Press, 1988. p. 214-234.
- MOURA, E. F. et al. Anatomy, histochemistry and ultrastructure of seed and somatic embryo of *Acrocomia aculeata* (Arecaceae). *Scientia Agricola*, v. 67, p. 399-407, 2010.
- MURASHIGE, T.; SKOOG, F. A revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco tissue cultures. *Physiologia Plantarum*, v. 15, p. 473-497, 1962.
- NAKAMURA, T.; TANIGUCHI, T.; MAEDA, E. Cyto-histological studies on somatic embryos of Coffee: ultrastructural Aspects. *Japanese Journal of Crop Science*, v. 63, p. 144-157, 1994.
- OLIVEIRA, L. A.; REIS, J. P.; FERREIRA, C. M. Efficiency of fertilizer use in coffee seedling production. *Journal of Coffee Science*, v. 19, n. 2, p. 145-160, 2022.
- OLIVEIRA, R. M.; SANTOS, M. C.; ALVES, T. A. Balancing water retention and drainage in substrates for coffee seedlings. *Journal of Coffee Science*, v. 18, n. 2, p. 122-135, 2023.
- PENDERGRAST, M. *Uncommon Grounds: The History of Coffee and How It Transformed Our World*. New York: Basic Books, 2010.
- PEREIRA, J.; SILVA, R. P.; MOURA, G. A. Root development in different substrate compositions. *Plant Physiology*, v. 31, p. 89-95, 2022.
- PHILLIPS, J. Apical dominance. *Annual Review of Plant Physiology*, v. 26, p. 341-367, 1975.
- RIBEIRO, A. C.; BARROS, L. F.; MOREIRA, E. F. Substrate physical properties and seedling quality. *Brazilian Journal of Horticulture*, v. 12, p. 230-245, 2021.
- RÖMHELD, V.; KIRKBY, E. A. Research on potassium in agriculture: needs and prospects. *Plant and Soil*, v. 335, n. 1-2, p. 155-180, 2010.

- RUÍZ-SOLSOL, H.; MESEN, F. Efecto del ácido indolbutírico y tipo de estacilla en el enraizamiento de sacha inchi (*Plukenetia volubilis* L.). *Agronomía Costarricense*, v. 34, p. 259-267, 2010.
- SANTOS, G. R.; MARTINS, A. S.; CUNHA, L. E. Evaluating substrate components in seedling production. *Agricultural Sciences*, v. 19, p. 112-127, 2023.
- SILVA, A. C.; NEVES, R. J. Nutrient dynamics in coffee seedlings: the role of potassium and nitrogen. *Plant Nutrition Journal*, v. 25, p. 121-134, 2021.
- SILVAROLLA, M. B.; MAZZAFERA, P.; FAZUOLI, L. C. A naturally decaffeinated arabica coffee. *Nature*, v. 429, p. 826, 2004.
- SMITH, J. A.; FISHER, P. R. Substrate oxygenation and root growth in horticultural crops. *Horticultural Science Review*, v. 15, p. 30-45, 2023.
- SMITH, K. A.; JONES, M. G.; BROWN, H. E. Fertilizers and root growth: understanding the relationship. *Root Biology and Fertilizer Use*, v. 12, p. 220-235, 2020.
- SMITH, R. H. *Plant tissue culture: techniques and experiments*. 2nd ed. San Diego: Academic Press, 2003.
- SONDAHL, M. R.; CAMPOS, C. M.; SOUZA, F. I. Propagação clonal de *Coffea arabica* via embriogênese somática. *Revista Brasileira de Botânica*, São Paulo, v. 25, n. 1, p. 45-52, 2002.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. *Fisiologia e desenvolvimento vegetal*. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.
- VAN DER VOSSEN, H. A. M.; BERTRAND, B.; CHARRIER, A. Next generation variety development for sustainable production in the global coffee industry. *Food Security*, v. 7, n. 4, p. 601-614, 2015.
- VEGA, F. E. (Ed.). *Coffee: Growing, Processing, Sustainable Production*. Weinheim: Wiley-VCH, 2008.
- WELLMAN, F. L. *Coffee: Botany, Cultivation, and Utilization*. New York: Interscience Publishers, 1961.
- WINTGENS, J. N. (Ed.). *Coffee: Growing, Processing, Sustainable Production*. 2nd ed. Wallingford: CABI, 2004.