

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

EMMELINE VEIGA MATTOS

AVALIAÇÃO DE SUBSTRATOS COM CONDICIONADORES PARA A PRODUÇÃO
DE MUDAS DE HORTALIÇAS

CURITIBA

2025

EMMELINE VEIGA MATTOS

AVALIAÇÃO DE SUBSTRATOS COM CONDICIONADORES PARA A PRODUÇÃO
DE MUDAS DE HORTALIÇAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Graduação em Engenharia Agrônoma, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Agrônoma.

Orientador: Prof. Dr. André Carlos Auler

CURITIBA

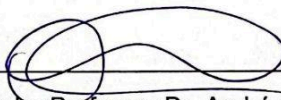
2025

TERMO DE APROVAÇÃO

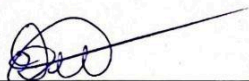
EMMELINE VEIGA DE MATTOS

AVALIAÇÃO DE SUBSTRATOS COM CONDICIONADORES PARA A PRODUÇÃO DE MUDAS DE HORTALIÇAS

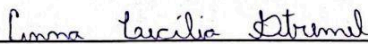
Trabalho apresentado como requisito parcial à obtenção do grau de Engenharia Agrônoma no Curso de Graduação em Agronomia, pela seguinte banca examinadora:



Orientador Professor Dr. André Carlos Auler
Departamento de Solos e Engenharia Agrícola
Setor de Ciências Agrárias



Professor Dr. Daniel Hanke
Departamento de Solos e Engenharia Agrícola
Setor de Ciências Agrárias



Mestranda Anna Cecília Ferreira Stremel
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo
Setor de Ciências Agrárias

Curitiba, 18 de julho de 2025

Dedico este trabalho aos meus familiares, amigos e a todas as pessoas que sempre estiveram ao meu lado. A cada palavra de apoio, gesto de carinho e presença silenciosa que me ajudaram a seguir em frente, deixo aqui a minha mais sincera gratidão.

AGRADECIMENTOS

Chegar até aqui foi uma mistura de esforço, dúvida, superação e, acima de tudo, apoio. E é por isso que esse momento não poderia passar sem agradecer, de coração, a todos que estiveram comigo nessa caminhada.

Ao meu orientador, professor André Carlos Auler, por ter sido muito mais do que um orientador. Obrigada por acompanhar cada etapa, por tirar dúvidas com paciência, por estar presente nos momentos difíceis e por caminhar neste projeto junto comigo. Sua orientação fez toda a diferença.

Aos colegas do GEIES, que estiveram ao meu lado nos dias de coleta, nas análises, nas conversas do laboratório, obrigada por cada ajuda, cada esclarecimento e cada momento compartilhado. Foi graças à colaboração de vocês que as coisas fluíram com mais leveza.

À minha família, meu alicerce, que nunca deixou de acreditar em mim. Obrigada por me ensinarem desde cedo a ser determinada, a lutar pelo que acredito e a continuar mesmo quando o caminho parece mais difícil. Muito do que sou hoje vem de vocês.

Um agradecimento muito especial à professora Glaciela Kaschuk, que teve um papel fundamental no meu retorno à Universidade. Quando eu pensava que tinha perdido a chance de terminar minha graduação, foi ela quem me deu uma nova perspectiva. Esse trabalho foi possível por causa, você tem toda a minha gratidão e carinho.

Aos amigos que estiveram comigo ao longo da graduação e do trabalho de conclusão de curso, obrigada por cada palavra de apoio, cada gesto de incentivo e por acreditarem no meu potencial mesmo quando eu duvidava.

E à UFPR, por ser parte dessa trajetória que me transformou tanto academicamente e pessoalmente.

Esse trabalho é prova de que, com persistência, apoio e coragem, é possível recomeçar e seguir em frente. Às vezes a gente só precisa acreditar mais um pouquinho. E seguir. Sempre.

“Eureka.”

— Arquimedes, séc. III a.C.

RESUMO

A qualidade do substrato é um fator determinante para a germinação e o desenvolvimento inicial das mudas, impactando diretamente a produtividade agrícola. Este estudo tem como objetivo comparar diferentes formulações de substratos contendo condicionadores como vermiculita, bentonita, poliacrilamida, biocarvão de bambu e psyllium, em relação a um substrato comercial e um controle. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, utilizando delineamento inteiramente casualizado. Foram avaliadas características físicas (retenção de umidade, densidade, integridade dos torrões), químicas (pH, condutividade elétrica e perfil nutricional) e morfológicas (crescimento radicular e foliar) das plantas. Os dados foram submetidos à análise estatística e à comparação entre tratamentos. Espera-se que os resultados auxiliem na recomendação de substratos alternativos que reduzam custos de produção, garantem qualidade e permitam maior flexibilidade nas condições de armazenamento e aplicação por produtores.

Palavras-chave: Viveiros; Retenção de água; Desenvolvimento de mudas; Vermiculita; Biochar.

ABSTRACT

The quality of the substrate is a determining factor for seedling germination and early development, directly impacting agricultural productivity. This study aims to compare different substrate formulations containing conditioners such as vermiculite, bentonite, polyacrylamide, bamboo biochar, and psyllium, in relation to a commercial substrate and a control. The experiment was conducted in a greenhouse under a different situation. Physical characteristics (moisture retention, density, and clod integrity), chemical properties (pH, electrical conductivity, and nutrient profile), and morphological traits (root and shoot growth) of the plants. Data were subjected to statistical analysis and treatment comparison. The results are expected to support the recommendation of alternative substrates that reduce production costs, ensure quality, and offer greater flexibility in storage and application for growers.

Keywords: Seedling nurseries; Water retention; Substrate development; Vermiculite; Biochar.

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – Média da porcentagem de umidade retida nos substratos ao longo do tempo	41
GRÁFICO 2 – Curvas de Retenção de Umidade dos Substratos.	43
GRÁFICO 3 – Perfil de Nutrientes no Substrato com Carolina Soil.	51
GRÁFICO 4 – Perfil de Nutrientes no Substrato com Poliacrilamida.	52
GRÁFICO 5 – Perfil de Nutrientes no Substrato com Psyllium.	52
GRÁFICO 6 – Perfil de Nutrientes no Substrato com Controle.	53
GRÁFICO 7 – Perfil de Nutrientes no Substrato com Vermiculita.	53
GRÁFICO 8 – Perfil de Nutrientes no Substrato com Biochar de Bambu.	54
GRÁFICO 9 – Perfil de Nutrientes no Substrato com Bentonita.	54
GRÁFICO 10 – Área Foliar por planta (AF) e por regime de irrigação.	67
GRÁFICO 11 – Superfície Aparente por planta (SA) e por regime de irrigação.	67
GRÁFICO 12 – Comprimento radicular por planta sob diferentes substratos e regimes de irrigação (cm).	68
GRÁFICO 13 – Volume radicular por planta sob diferentes substratos e regimes de irrigação (cm³).	68
GRÁFICO 14 – Distribuição de diâmetro radicular $0 < D \leq 0,5$ (mm).	69
GRÁFICO 15 – Distribuição de diâmetro radicular $0,5 < D \leq 1,0$ (mm).	69
GRÁFICO 16 – Distribuição de diâmetro radicular $1,0 < D \leq 1,5$ (mm).	70

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – Escala de notas para avaliação da qualidade dos torrões após a retirada das mudas, com base na integridade física, aderência e resistência.

29

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Valores médios, em porcentagem, de umidade.	38
TABELA 2 – Valores médios de Densidade úmida e Densidade seca.	39
TABELA 3 – Propriedades físicas e mecânicas dos materiais utilizados no dimensionamento das bancadas.	39
TABELA 4 – Análise estrutural de materiais para bancadas de cultivo de mudas.	39
TABELA 5 – Média das Notas atribuídas aos substratos por regime de irrigação (com desvio amostral).	45
TABELA 6 – Perda de massa (%) dos torrões após a queda, por substrato e regime de irrigação.	46
TABELA 7 – Área Foliar (AF) e Superfície Aparente (SA) por planta, substrato e regime de irrigação.	47
TABELA 8 – Comprimento, Volume e Distribuição de raízes por classes de diâmetro por planta, substrato e regime de irrigação.	47
TABELA 9 – Matéria seca (%) das folhas após secagem em estufa, por substrato e regime de irrigação.	48
TABELA 10 – Matéria seca (%) das raízes após secagem em estufa, por substrato e regime de irrigação.	49
TABELA 11 – Valores médios de pH e Temperatura (°C), por substrato.	50
TABELA 12 – Valores médios de Condutividade Elétrica (CE), Temperatura (°C) e Interpretação indicativa por substrato.	51
TABELA 13 - Comparação de Custos entre Substratos Formulados e Comercial.	57

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

PRFV - Plástico Reforçado com Fibra de Vidro

UFPR - Universidade Federal do Paraná

PEAD - Plástico de polietileno de alta densidade

CTC - Capacidade de troca catiônica

CETEM - Centro de tecnologia mineral

CE - Condutividade elétrica

CRA - Capacidade de retenção de água

NPK - Nitrogênio (N), Fósforo (P) e Potássio (K)

SDA - Secretaria de Defesa Agropecuária

ASTM - American Society for Testing and Materials

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

NBR - Norma Brasileira

ANOVA - Análise de Variância

CM - Contexto de substratos (Substrato comercial)

PA - Poliacrilamida

PS - Psyllium

CO - Controle

VM - Vermiculita

BB - Biochar de bambu

BN - Bentonita

SA - Superfície aparente

AF - Área Foliar

D - Diâmetro

LISTA DE SÍMBOLOS

® - marca registrada

< - menor

≤ - menor ou igual

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1. PROBLEMA	17
1.2. OBJETIVOS	18
1.2.1. Objetivo geral	18
1.2.2. Objetivos específicos	19
1.3. JUSTIFICATIVA	20
2. REVISÃO DE LITERATURA	16
2.1. Importância dos Substratos na Produção de Mudas	16
2.2. Substratos Comerciais e Alternativas Sustentáveis	16
2.3. Condicionadores Físicos e Químicos Aplicados aos Substratos	17
2.4. Parâmetros de Avaliação dos Substratos	17
2.5. Engenharia Aplicada à Produção de Mudas	18
3. MATERIAL E MÉTODOS	19
3.1. Formulação dos Substratos	19
4. ANÁLISES FÍSICAS	21
4.1. Determinação da Umidade Atual dos Substratos	21
4.2. Determinação da Densidade Aparente dos Substratos	21
4.3. Análise de Bancadas para cultivo de Mudas	22
4.4. Retenção de Água ao longo do Tempo	27
4.5. Determinação da Capacidade de Retenção de Água (CRA10)	27
4.6. Avaliação da Integridade do Torrão	29
4.7. Ensaio de Queda de Torrão	32
4.8. Análise Morfológica de Raízes e folhas via WinRHIZO	33
4.8.1. Interpretação - Crescimento da Parte Aérea via Análise Digital (WinRHIZO)	34
4.8.2. Interpretação - Crescimento das Raízes via Análise Digital (WinRHIZO)	34
4.9. Determinação da Matéria Fresca e Seca de Raízes e Folhas	34
5. ANÁLISES QUÍMICAS	35
5.1. Determinação do pH dos Substratos	35
5.2. Determinação da Condutividade elétrica dos Substratos (CE)	36
5.3. Digestão para Análise de Nutrientes dos Substratos	37
6. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DAS ANÁLISES FÍSICAS	38
6.1. Umidade Atual dos Substratos - Resultados	38
6.2. Densidade Aparente dos Substratos - Resultados	39
6.3. Avaliação Física das Bancadas para cultivo de Mudas	39
6.4. Retenção de Água ao longo do Tempo - Resultados	41
6.5. Capacidade de Retenção de Água (CRA10) - Resultados	42
6.6. Avaliação da Integridade do Torrão - Resultados	45
6.7. Ensaio de Queda de Torrão - Resultados	45
6.8. Análise Morfológica de Raízes e folhas via WinRHIZO - Resultados	47
6.8.1. Interpretação - Crescimento da Parte Aérea via Análise Digital (WinRHIZO)	47
6.8.2. Interpretação - Crescimento das Raízes via Análise Digital (WinRHIZO)	47
6.9. Matéria Fresca e Seca de Raízes e Folhas - Resultados	48
7. APRESENTAÇÃO E RESULTADOS DAS ANÁLISES QUÍMICAS	50
7.1. pH dos Substratos - Resultados	50

7.2. Condutividade elétrica dos Substratos (CE) - Resultados	50
7.3. Digestão para Análise de Nutrientes dos Substratos- Resultados	51
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS	56
8.1. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	57
REFERÊNCIAS	59
APÊNDICE 1 – GRÁFICOS WINRHIZO	67
ANEXO 1 – REFERÊNCIA DE INTERPRETAÇÃO DA CE	70

1.INTRODUÇÃO

Uma fase em que a produção de mudas se destaca é uma condição importante para o sucesso das lavouras, isto é, a qualidade física, fisiológica e nutricional das plântulas. Nesse cenário, o substrato tem um papel determinante, fornecendo apoio físico, capacidade de retenção de água, disponibilidade de oxigênio e nutrientes para o crescimento inicial das plântulas. Porosidade, granulometria, pH e a capacidade de troca catiônica responsável pela condutividade e firmamento radicular, consolidação radicular e desempenho das mudas no transplante, impactando no desempenho futuro da agricultura (UNESP, 2024). Mesmo que os substratos comerciais sejam extremamente comuns em viveiros, o alto custo e o transporte de materiais de diferentes lugares por pequenos e médios agricultores podem ser desafiante. Um estudo de Castro et al. (2010), revelou que o custo do substrato pode chegar a 38% de todo o gasto da produção de mudas de cafeeiro, demonstrando a importância econômica da qualidade da escolha desse insumo. Ademais, os comercializadores subsequentes nem sempre têm as mesmas qualidades, uma vez que podem ter diferenças em sua qualidade física, etiológica e química, comprometendo o desenvolvimento das plantas. Neste sentido, o desenvolvimento de substratos alternativos com fontes locais e materiais de baixo custo torna-se uma opção promissora. Combinações de condicionadores de solos orgânicos e inorgânicos, com biomassa, vermiculita, bentonita, psyllium e poliacrilamida, estão sendo estudadas de modo a obter uma maior capacidade de retenção de água, aeração, nutrientes. A Embrapa, por exemplo, recomenda o uso de substratos compostos por fibras vegetais, composto orgânico e areia como alternativa de alta qualidade e menor impacto ambiental (Centro de Inteligência em Orgânicos, 2025). O uso dessas formulações também contribui para a sustentabilidade, ao incorporar materiais reaproveitados e reduzir a dependência de recursos não renováveis.

1.1. PROBLEMA

A produção de mudas é uma etapa importante para a formação de culturas vigorosas e produtivas, sendo influenciada pela qualidade dos substratos utilizados. Entretanto, substratos comerciais disponíveis no mercado costumam ter alto custo e

composição limitada, o que restringe o acesso por parte de pequenos produtores e compromete a viabilidade em larga escala. Em contrapartida, materiais alternativos como vermiculita, bentonita, biocarvão de bambu, poliacrilamida e psyllium têm sido estudados como condicionadores físicos e químicos, mas ainda carecem de comparações mais amplas e contextualizadas com substratos comerciais.

Além disso, ao longo da realização deste trabalho, foram observadas lacunas significativas na literatura que vão além da escolha do material: há carência de metodologias para avaliação da qualidade dos torrões em mudas produzidas em bandejas, uma vez que a maioria dos estudos disponíveis se limita a tubetes e não apresenta escalas visuais adaptadas. Do ponto de vista analítico, a interpretação dos dados de digestão química também se mostrou limitada, já que as tabelas de referência disponíveis são voltadas para solos e não se aplicam diretamente à realidade dos substratos. Outro ponto crítico foi a análise de carga nas bancadas, que exigiu conhecimentos de física e engenharia, revelando a necessidade de maior integração entre essas áreas e a prática agrônômica.

Essa experiência evidencia um cenário em que o profissional de Engenharia Agrônômica é chamado a ir além da botânica e da produção vegetal, sendo também responsável por resolver problemas estruturais, calcular pressões físicas e tomar decisões técnicas com base em dados interdisciplinares. Diante disso, questiona-se: quais substratos alternativos podem aliar desempenho técnico, viabilidade econômica e sustentabilidade, contribuindo de forma prática e segura para a produção de mudas?

1.2.OBJETIVOS

1.2.1.Objetivo geral

Avaliar diferentes formulações de substratos contendo condicionadores orgânicos e minerais quanto às propriedades físicas, químicas e ao desempenho na produção de mudas de tomateiro, visando identificar opções eficientes e economicamente viáveis.

1.2.2.Objetivos específicos

- Determinar a densidade úmida dos substratos e a carga exercida sobre a bancada;
- Avaliar a perda de massa do torrão após o transplante simulado;
- Medir o pH e a condutividade elétrica (CE) dos substratos;
- Avaliar a capacidade de retenção de água a diferentes tensões (CRA);
- Analisar o teor de nutrientes disponíveis nos substratos por meio de digestão ácida;
- Avaliar a morfologia radicular e área foliar por meio do sistema WinRHIZO;
- Determinar os teores de matéria fresca e seca de raízes e folhas.

1.3.JUSTIFICATIVA

A atual demanda crescente por mudas de qualidade e aumento de custos envolvidos em sua cadeia produtiva coloca grande pressão ou a necessidade de alternativas que permitam um desempenho agrônomo, mas ao mesmo tempo sejam economicamente viáveis. Embora comumente adotados, o uso de substratos comerciais nem sempre é possível, particularmente, para produtores familiares, devido ao alto custo associado e à disponibilidade local restrita. O transporte de substratos comerciais também adiciona custos às plantas envasadas, e a natural variabilidade associada à sua composição pode resultar em falta de uniformidade de germinação e plântulas. Portanto, neste trabalho, foi objetivo avaliar os substratos formulados com materiais alternativos e condicionadores acessíveis para identificar uma combinação que tenha bom desempenho físico, químico e fisiológico, mas que seja ao mesmo tempo barato. Espera-se, assim, fornecer conhecimento para a produção de mudas mais baratas, eficientes e ecologicamente corretas, particularmente em áreas onde substratos comerciais não estão disponíveis.

2.REVISÃO DE LITERATURA

2.1.Importância dos Substratos na Produção de Mudas

O substrato funciona como base de sustentação e precisa oferecer, ao mesmo tempo, porosidade, retenção de água, aeração e uma certa estabilidade física. Quando esses fatores estão equilibrados, a emergência das plântulas tende a ser mais uniforme e o sistema radicular consegue se desenvolver melhor (SOUZA, 2000; FERMINO, 2005).

Na prática, quem trabalha com viveiros sabe que nem sempre é fácil encontrar um substrato que atenda a todos esses critérios de forma equilibrada. A depender da cultura, do tipo de recipiente e até das condições ambientais, pode ser necessário ajustar a composição para que as mudas tenham um bom desempenho logo no início do ciclo.

2.2.Substratos Comerciais e Alternativas Sustentáveis

Os substratos comerciais costumam ser usados por sua praticidade e regularidade pois eles já vêm prontos, com granulometria ajustadas e composição pensada para a maioria das culturas. Porém, têm algumas limitações, sendo o preço uma delas, principalmente para pequenos produtores ou viveiros que operam com muitos recipientes. Além disso, muitos desses substratos usam componentes como turfa ou casca de pinus, que nem sempre são renováveis ou acessíveis em todas as regiões. Por isso, cresce o interesse por alternativas que sejam mais econômicas, sustentáveis e que possam ser formuladas com materiais locais (BRITO; MOURÃO, 2014; ABA, 2023).

Substratos feitos com restos vegetais, casca de arroz carbonizada, esterco ou outros materiais orgânicos têm mostrado resultados positivos. Mas o desafio ainda é grande: a composição pode variar bastante de um lote para outro e, sem cuidado, a qualidade pode cair (MENEZES JÚNIOR et al., 2023).

2.3. Condicionadores Físicos e Químicos Aplicados aos Substratos

Para tentar ajustar o substrato às necessidades das mudas, muitos produtores têm apostado em condicionadores físicos e químicos. Esses materiais são adicionados em pequenas proporções para melhorar retenção de água, porosidade, estabilidade e até liberar nutrientes com mais eficiência.

A poliacrilamida, um polímero que age como hidrogel, chama atenção por sua capacidade de segurar água e liberá-la aos poucos para as raízes. O biochar, especialmente quando feito de bambu, é uma alternativa interessante, pois ajuda tanto na parte física quanto a química do substrato melhorando a CTC e criando um ambiente mais estável. O psyllium, embora comum, tem se mostrado promissor por ser uma fibra com alto poder de retenção de água e por ter origem natural e sustentável (SILVA et al., 2013; BRASIL, 2014; NAVROSKI, 2008). Cada um desses condicionadores tem vantagens e limitações, mas quando combinados de forma equilibrada, podem transformar um substrato simples em um meio de cultivo mais completo.

2.4. Parâmetros de Avaliação dos Substratos

Ao testar um substrato, é importante considerar tanto aspectos físicos quanto químicos e morfológicos. A retenção de água é um dos primeiros pontos observados, já que uma boa parte do sucesso das mudas depende do sucesso das mudas dependente de água. A porosidade e o espaço para aeração também entram nessa conta, sem isso, as raízes não respiram bem.

Outro critério importante é a estabilidade do torrão. No momento do transplante, o ideal é que o substrato esteja coeso o suficiente para não se desmanchar, mas sem estar compactado. Infelizmente, ainda há pouca referência para avaliação de torrões em bandejas. A maioria dos estudos trabalha com tubetes e poucas escalas foram adaptadas para diferentes formatos e materiais (FERREIRA et al., 2007; MARTINAZZO et al., 2021).

Além disso, se avalia também a condutividade elétrica (CE), que indica salinidade do substrato, e o pH, a disponibilidade dos nutrientes. Na parte morfológica, o desenvolvimento das plantas costuma ser analisado por meio de parâmetros como altura, área foliar e crescimento radicular, refletindo a adequação

do substrato às exigências fisiológicas da cultura (HORTICULTURA ORNAMENTAL, 2020; EMBRAPA, 2008).

2.5. Engenharia Aplicada à Produção de Mudas

Durante a condução deste trabalho, ficou evidente que a produção de mudas não depende só da parte vegetal, a estrutura física onde elas são cultivadas também tem impacto. No caso das bancadas, por exemplo, não havia quase nenhuma referência sobre como calcular a carga total suportada ou como adaptar o espaço para evitar acidentes e sobrecargas.

Foi preciso recorrer à física, mais especificamente à Lei de Bernoulli, para entender como a pressão e o peso da água e dos substratos influenciam a estrutura das bancadas (LIMA, 2022). Esse tipo de análise não costuma aparecer em trabalhos agrônômicos, mas é essencial quando se quer pensar em escala maior, com segurança e durabilidade.

Além disso, a parte ergonômica também entra aqui, a altura da bancada, o peso do substrato e o esforço repetitivo afetam diretamente o conforto e a saúde dos trabalhadores, mostrando que o profissional da Engenharia Agrônômica precisa transitar entre o campo e o projeto, entre a planta e estrutura.

3.MATERIAL E MÉTODOS

3.1.Formulação dos Substratos

O experimento foi conduzido em ambiente controlado de laboratório e em casa de vegetação pertencentes ao Departamento de Solos e Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Paraná (UFPR), localizado em Curitiba-PR (25° 24' 46" S; 49° 14' 51" W). O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Cfb — subtropical úmido, com verões amenos e ausência de estação seca definida (ALVARES et al., 2013).

Foram avaliadas sete formulações experimentais de substrato, elaboradas na própria universidade, além de um substrato comercial utilizado como controle positivo (Carolina Soil®, formulação LXXXV). As formulações experimentais foram obtidas de uma base orgânica padronizada composta por 60% de casca de pinus, 15% de casca de arroz carbonizado e 15% de cama de frango estabilizada com calcário totalizando 90% do total de matérias-primas. Os condicionadores foram então incorporados, melhorando proporcionalmente 10% para esta base, de acordo com o tratamento. Assim, cada substrato formulado foi composto por 90% da base padrão e 10% do respectivo condicionador, exceto para os substratos com poliacrilamida (0,5%) e psyllium (1,5%).

A seguir, estão as dosagens das formulações testadas:

- **Substrato com Biochar de Bambu Granulado Ativado (10%):** Segundo Silva et al. (2013), o uso de biochar de bambu como condicionador contribui significativamente para o aumento da CTC, retenção de nutrientes e estabilidade física do substrato.
- **Substrato com Vermiculita Expandida (10%):** A vermiculita é amplamente utilizada como condicionador por sua elevada capacidade de retenção de água e melhoria da aeração, conforme descrito por Sampaio (2001).
- **Substrato com Bentonita (10%):** A bentonita é uma argila com alta capacidade de retenção hídrica, além de melhorar a estrutura física do substrato (CETEM, 2012).

- **Substrato com Poliacrilamida (0,5%):** A poliacrilamida, um hidrogel sintético super absorvente, apresenta alta capacidade de retenção de água, liberando-a lentamente às raízes (Navroski, 2008).
- **Substrato com Psyllium (1,5%):** O psyllium, derivado da casca de *Plantago ovata*, é um hidrogel orgânico com alta capacidade de absorção de água, sendo uma alternativa sustentável na formulação de substratos (BRASIL, 2014).
- **Substrato Controle (10% pinus adicional):** Esta formulação foi utilizada como padrão de comparação. O uso de casca de pinus como componente orgânico base de substratos é comum em viveiros, por apresentar boa estabilidade estrutural e drenagem (EMBRAPA, 2015).
- **Substrato Comercial Carolina Soil® (formulação LXXXV):** O substrato Carolina Soil®, utilizado como padrão comercial neste estudo, é amplamente reconhecido por sua uniformidade física, composição balanceada e controle rigoroso de qualidade. A formulação LXXXV, utilizada no experimento, corresponde funcionalmente à linha profissional Classe LXXXVI, atualmente mais comum no mercado. Ambas apresentam equivalência quanto à estrutura física e desempenho agronômico, sendo indicadas para mudas de hortaliças, flores, frutíferas e ornamentais exigentes.

A composição típica dessa classe de substratos inclui turfa de sphagnum (matéria orgânica altamente retentora de umidade), vermiculita expandida (para aeração), casca de arroz carbonizada, corretivos como calcário dolomítico, e em algumas versões, gesso agrícola e hidrofibras. Além disso, é acrescido fertilizante de liberação lenta em baixa dosagem. O pH da formulação gira em torno de $5,5 \pm 0,5$, e a condutividade elétrica média situa-se na faixa de $0,7 \pm 0,3$ dS/m.

Por sua composição equilibrada e elevada qualidade industrial, o substrato Carolina Soil® é considerado uma referência técnica no setor de mudas, apresentando elevado desempenho em uniformidade de emergência e desenvolvimento radicular, além de praticidade por ser um produto pronto para uso (CAROLINA SOIL, 2024; EMBRAPA, 2015).

Todos os substratos formulados receberam adubação padronizada, composta por dois fertilizantes sólidos e um líquido, com o objetivo de suprir macro e

micronutrientes necessários ao desenvolvimento inicial das plântulas. Foram utilizados:

- **NPK 10-10-10** (com 8% de Ca, 2% de Mg e 1% de S);
- **NPK 8-16-10** (com 4% de Ca, 2% de Mg e 4% de S);
- **Fertilizante organomineral líquido completo**, contendo: C orgânico total (0,060%), N (0,100%), P (0,060%), K (0,060%), Ca (0,010%), Mg (0,005%), B (0,005%), Cu (0,002%), Mn (0,010%), Mo (0,001%) e Zn (0,010%).

Os fertilizantes sólidos foram anteriormente moídos e peneirados para um tamanho inferior a 2 mm e incorporados na taxa de 5 kg a cada 100 L de substrato seco. O fertilizante líquido, foi aplicado na proporção de 50 mL para cada 1 L de água, sendo essa solução adicionada na proporção de 1 L para 15 L de substrato a fim de fornecer devidamente os micronutrientes. Após receberem o composto, todos os substratos foram deixados em repouso por 24 horas para redistribuir a umidade e os nutrientes adicionados.

4.ANÁLISES FÍSICAS

4.1.Determinação da Umidade Atual dos Substratos

A umidade atual dos substratos foi determinada com base na Instrução Normativa SDA nº 17/2007 do MAPA, que estabelece os métodos oficiais para análise de substratos (BRASIL, 2007). Foram analisadas sete formulações de substrato: Carolina Soil (comercial), Controle, Vermiculita, Bentonita, Biochar de bambu, Psyllium e Poliacrilamida, com quatro repetições cada, totalizando 28 amostras.

Cada amostra foi pesada imediatamente após o experimento de densidade, sem padronização da massa (massa úmida real, conforme preenchimento natural do béquer). Em seguida, os béqueres contendo os substratos foram levados à estufa ventilada a 65 °C (± 5 °C) por 24 horas, até atingirem massa constante. Depois as amostras foram pesadas novamente obtendo-se assim a massa seca para cada substrato.

A umidade foi calculada segundo a fórmula:

$$Umidade\ Atual\ (\% m/m) = \left[\frac{(Massa\ úmida - Massa\ seca)}{Massa\ Úmida} \right] \times 100 \quad (1)$$

4.2.Determinação da Densidade Aparente dos Substratos

A densidade aparente influencia diretamente aspectos como a aeração, a retenção de água e a estabilidade mecânica do substrato, sendo considerada uma propriedade essencial na seleção de materiais para a produção de mudas. Os procedimentos seguiram os métodos da Instrução Normativa SDA nº 17/2007 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, que estabelece diretrizes para análise de substratos e condicionadores de solo. Para tanto, foram utilizadas provetas plásticas graduadas de 500 mL, nas quais 300 mL de cada substrato, previamente misturado e mantido em sua umidade natural, foram depositados sem compactação ativa, apenas com nivelamento da superfície. A proveta foi submetida a dez quedas livres de 10 cm de altura, conforme descrito na norma, permitindo o assentamento natural do material. Em seguida, o volume final foi registrado e a massa úmida do substrato foi obtida por pesagem em balança digital, descontando-se previamente a tara da proveta vazia. Após isso, as amostras foram secas em estufa a $65\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 48 horas, permitindo a obtenção da massa seca.

A densidade úmida foi calculada por meio da fórmula:

$$Densidade\ Úmida\ (kg/m^3) = \left[\frac{Massa\ úmida}{Volume} \right] \times 100 \quad (2)$$

A densidade seca foi calculada por meio da fórmula:

$$Densidade\ seca\ (kg/m^3) = densidade\ úmida \times \left[\frac{1 - umidade\ atual}{100} \right] \quad (3)$$

4.3.Análise de Bancadas para cultivo de Mudass

Ao projetar bancadas para mudas com fertirrigação, considerou-se a necessidade de garantir resistência estrutural frente às cargas aplicadas pelas bandejas com substrato saturado. Para isso, utilizou-se a Teoria Clássica de Vigas

de Euler–Bernoulli, a qual permite estimar as deformações e tensões atuantes ao longo de uma viga submetida a uma carga distribuída. Essa teoria, desenvolvida por Leonhard Euler e Daniel Bernoulli no século XVIII, assume que as seções transversais da viga permanecem planas e perpendiculares ao eixo neutro mesmo após a flexão, hipótese válida dentro do regime da elasticidade linear (BEER & JOHNSTON, 2013; HIBBELER, 2017).

A metodologia adotada para o dimensionamento da bancada considerou como carga principal o peso das bandejas preenchidas com substrato. A largura da bancada foi fixada em 1,30 m, o que permite o posicionamento lado a lado de duas bandejas padrão de 53,5 cm. O substrato adotado para o cálculo foi a bentonita, por apresentar elevada capacidade de retenção de água e, consequentemente, representar um cenário conservador de carga. A densidade úmida do material foi determinada como 619,92 kg/m³.

A seguir, apresentam-se os principais valores de entrada e equações utilizadas no dimensionamento:

Fórmulas utilizadas:

Cálculo	Fórmula	Variáveis
(4) Peso	$P = \rho \cdot V \cdot g$	ρ : densidade (kg/m³), V: volume (m³), g: 9,81 m/s²
(5) Incremento de carga (q_m)	$q_m = \rho \cdot b \cdot h \cdot g$	b: largura (m), h: espessura (m)
(6) Fator de correção (f_c)	$f_c = \frac{q_{\text{substrato}} + q_m}{q_m}$	q_{sub} : carga do substrato, q_m : carga do material
(7) Momento de inércia (I)	$I = \frac{(b \times h^3)}{12}$	
(8) Módulo resistente (W)	$(W) = \frac{(b \times h^2)}{6}$	
(9) Momento fletor (M_{ax})	$(M_{\text{ax}}) = \frac{(q \times L^2)}{8}$	q: carga total corrigida, L: comprimento da viga
(10) Tensão de flexão (σ)	$(\sigma) = \frac{M_{\text{ax}}}{W}$	

(11) Flecha máxima (f)	$(f) = \frac{5 \times q \times L^4}{384 \times E \times I}$	E: módulo de elasticidade
(12) Flecha admissível	$(f) \leq \frac{L}{360}$	

4.4.Retenção de Água ao longo do Tempo

A caracterização da retenção de umidade foi realizada conforme metodologia adaptada de Nascimento et al. (2021). Utilizou-se um dispositivo composto por funil com papel filtro e recipiente coletor (erlenmeyer), onde foi inserida uma massa conhecida de substrato. Após saturação com água deionizada, a umidade residual foi aferida aos 6, 12, 24, 48 e 96 horas, com quatro repetições por tratamento. Os aparelhos foram cobertos com filme PVC para minimizar perdas por evaporação. Um conjunto branco (apenas papel filtro umedecido) serviu como controle, confirmando que a retenção observada se devia unicamente ao substrato.

Os dados foram analisados quanto à normalidade e homogeneidade de variância por meio dos testes de Shapiro-Wilk e Bartlett, respectivamente. Posteriormente, foram submetidos à análise de variância (ANOVA) em delineamento inteiramente casualizado, com comparação de médias pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ($p < 0,05$), utilizando o software R (versão 4.4.1; R Core Team, 2025).

4.5.Determinação da Capacidade de Retenção de Água (CRA₁₀)

A capacidade de retenção de água (CRA) é uma propriedade essencial dos substratos utilizados na produção de mudas, pois determina a quantidade de água disponível para as plantas após a saturação e a drenagem gravitacional. O ensaio foi conduzido conforme os princípios estabelecidos pela Instrução Normativa SDA nº 31/2008 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, que regulamenta os métodos oficiais para a análise de substratos e condicionadores de solo. Foram utilizados anéis de alumínio com aproximadamente 100 mm de diâmetro interno por 50 mm de altura, resultando em volume médio de 392,7 cm³. Cada anel teve sua base vedada com tecido tipo voil fixado por elástico, conforme recomendação normativa. A massa do conjunto (anel + tecido + elástico) foi registrada previamente

para posterior correção dos dados. As amostras de substrato foram adicionadas aos anéis considerando o cálculo da massa ideal com base na densidade úmida previamente determinada para cada formulação.

Após o enchimento, os anéis foram submetidos à saturação completa, permanecendo submersos por 24 horas, com o nível de lâmina d'água posicionado 0,5 cm abaixo da borda superior dos cilindros, garantindo uma saturação uniforme por capilaridade ascendente. Esse processo respeita o Princípio de Bernoulli, segundo o qual, em um sistema em equilíbrio hidrostático, a distribuição da pressão e da energia potencial determina o movimento da água através dos poros, favorecendo a estabilização capilar no substrato.

Passado o período de saturação, os cilindros foram transferidos cuidadosamente para a mesa de tensão, equipada com papel de filtro e conectada a uma coluna d'água regulada para fornecer diferentes níveis de tensão matricial: 10, 30, 50, 75 e 100 hPa (ou cm de coluna de água), correspondentes a variações de disponibilidade hídrica no perfil do substrato. As amostras permaneceram na mesa até atingirem equilíbrio. Após a estabilização, os cilindros foram pesados para obtenção da massa úmida (massa 1), e, em seguida, as amostras foram secas em estufa a 65 °C por 48 horas, até atingirem massa constante (massa 2). Com esses dados, foi possível calcular a umidade volumétrica e a CRA para cada substrato, em diferentes tensões, por meio da equação:

$$CRA10 (\% v/v) = \frac{(M1 - M2) \times 100}{V_a}$$

(13)

Onde:

$CRA10 (\% m/m)$ = Capacidade de Retenção de Água (em porcentagem de água retida por unidade de massa do substrato, % m/m),

$M1$ = massa do substrato úmido após saturação (em gramas, g),

$M2$ = massa do substrato seco (em gramas, g),

V_a = Volume do anel (em centímetros cúbicos, cm³),

4.6.Avaliação da Integridade do Torrão

A integridade física dos torrões foi avaliada com o objetivo de verificar a coesão do substrato em torno do sistema radicular e a facilidade de retirada das mudas dos recipientes, sendo esta uma característica fundamental para a qualidade operacional durante o plantio.

Foram utilizadas 126 mudas por lâmina de irrigação, totalizando 378 amostras por substrato, desconsiderando-se as plantas das bordaduras para evitar possíveis influências externas. Todos os recipientes eram bandejas plásticas de cultivo padronizadas e a extração foi conduzida de forma manual buscando manter a aplicação da força em todos os tratamentos, tracionando cuidadosamente a base do caule.

A avaliação (QUADRO 1) foi realizada imediatamente após a retirada dos torrões, sem tempo de espera, por um único avaliador. A classificação foi feita com base na percepção da resistência à retirada, na aderência do substrato às raízes e na integridade física do torrão (presença de rachaduras, colapsos ou fragmentações). A escala utilizada foi elaborada com base em Ferreira et al. (2007) e Martinazzo et al. (2021), adaptada à realidade observada no experimento. Além disso, foram utilizadas imagens de referência, registradas após o experimento, para documentação e exemplificação visual das notas atribuídas.

QUADRO 1 – Escala de notas para avaliação da qualidade dos torrões após a retirada das mudas, com base na integridade física, aderência e resistência.

Escala (0 a 10 pontos)	Descrição	Imagem representativa
Nota 0 – Extremamente difícil	Torrão altamente aderido à bandeja, com o substrato praticamente colapsado. Retirada com muita dificuldade, com perda quase total da forma e estrutura. Ausência de raízes visíveis e quebra acentuada.	

Escala (0 a 10 pontos)	Descrição	Imagem representativa
Nota 1 – Muito difícil	Torrão ainda bastante fragmentado, com baixa presença de raízes visíveis. Saída forçada causa esfacelamento. Substrato parcialmente aderido à base da bandeja.	
Nota 2 – Difícil	Torrão sem formato bem definido, com base comprometida. A presença de raízes é discreta e localizada, e a retirada exige batidas repetidas.	
Nota 3 – Bastante difícil	Torrão se mantém parcialmente coeso, porém com colapso na parte inferior. Raízes pouco desenvolvidas na base, dificultando a retirada uniforme.	
Nota 4 – Consideravelmente difícil	Torrão com forma visível, mas com presença de falhas no substrato. Aderência ainda perceptível, sobretudo na parte inferior. Pouca ramificação radicular.	
Nota 5 – Moderadamente difícil	Torrão razoavelmente íntegro, com presença de raízes finas na superfície externa. Necessita de batidas moderadas para liberação, com leve perda de substrato.	

Escala (0 a 10 pontos)	Descrição	Imagem representativa
Nota 6 – Moderadamente fácil	Torrão com boa estrutura geral, raízes começando a se distribuir por todo o bloco. Substrato um pouco aderido à bandeja, mas sem comprometer a retirada.	
Nota 7 – Fácil	Torrão coeso, com raízes visíveis na periferia e discreto volume interno. Retirada com poucas batidas suaves, com pequena aderência de substrato no fundo.	
Nota 8 – Muito fácil	Torrão firme, com raízes bem distribuídas e cobrindo boa parte da superfície. Liberação quase espontânea após leve batida, substrato permanece aderido ao sistema radicular.	
Nota 9 – Extremamente fácil	Torrão solto, com raízes abundantes e interligadas. Pouca ou nenhuma retenção de substrato na bandeja. Saída rápida e limpa com leve inclinação do recipiente.	
Nota 10 – Totalmente fácil	Torrão completamente formado, cilíndrico e firme. Raízes uniformemente distribuídas por toda a massa. Retirada imediata, sem necessidade de batidas. Nenhuma perda de substrato ou colapso estrutural.	

FONTE: O autor (2025).

4.7. Ensaio de Queda de Torrão

O ensaio de queda de torrão teve como objetivo avaliar a integridade do substrato após a retirada da muda do recipiente, bem como a formação do sistema radicular ao redor do torrão, característica essencial para o manuseio e viabilidade da muda no transplante. Segundo Larcher (2000), a aderência do substrato às raízes é um indicador indireto da saúde e funcionalidade do sistema radicular, refletindo a capacidade da planta de explorar o meio e resistir a estresses mecânicos, como o manuseio durante o plantio.

Foram utilizados os mesmos sete substratos testados no ensaio de Integridade do Torrão. As coletas seguiram um padrão de umidade adequado para plantio, evitando tanto a saturação quanto a secura excessiva, simulando as condições práticas utilizadas por produtores durante o transplantio. As irrigações foram previamente realizadas conforme os tratamentos estabelecidos, garantindo a uniformidade da umidade no momento da coleta. Coletou-se 6 amostras por substrato em cada uma das três repetições por bancada, totalizando 126 amostras por lâmina de irrigação (7 substratos $\times$ 3 repetições $\times$ 6 amostras). Três níveis de irrigação foram considerados: uma, duas e três irrigações diárias. Cada amostra foi retirada manualmente do recipiente, teve sua escala previamente anotada e foi submetida ao teste de queda, a partir da bancada do laboratório, com altura de 94 cm. O torrão foi solto por ação da gravidade sobre uma bandeja rígida posicionada logo abaixo, a qual permitiu conter o material e observar a zona de inserção entre caule e raiz, além de possíveis desagregações do torrão.

As amostras foram pesadas antes e depois da queda utilizando balança analítica previamente nivelada e tarada. Foram analisadas com base na variação da massa antes e após o impacto, calculando-se a perda de massa relativa como indicador da resistência física do torrão. A equação utilizada para o cálculo está descrita:

$$Pm(\%) = \left(\frac{M_i - M_f}{M_i} \right) \times 100$$

Onde:

$Pm(\%)$ = perda de massa (em porcentagem, %),

M_i = massa do torrão antes da queda (em gramas, g),

M_f = massa do torrão após a queda (em gramas, g),

4.8. Análise Morfológica de Raízes e folhas via WinRHIZO

Para caracterização morfológica das folhas e raízes, foi utilizado o sistema de análise de imagem WinRHIZO 2013e Pro (Regent Instruments Inc.), reconhecido por sua precisão na mensuração de parâmetros vegetativos em mudas. A digitalização das estruturas vegetais foi feita com um scanner de mesa (Epson) acoplado ao software, conforme protocolo descrito por Marcon et al. (2011) e adaptado por Silva et al. (2022).

As folhas foram colhidas frescas e analisadas imediatamente, para não haver perda de água. Foram dispostas sobre uma placa acrílica transparente, evitando sobreposição, o que permite mensuração precisa da área foliar total (AF em cm²) e da superfície aparente (SA em cm²).

As raízes foram previamente coletadas das mesmas mudas utilizadas nas demais análises (Avaliação da Integridade do Torrão e Ensaio de Queda do Torrão), totalizando seis amostras por substrato, em três repetições para cada uma das três lâminas de irrigação. Após a coleta, os torrões foram mantidos em álcool 70% até a limpeza completa, prática recomendada para preservar a integridade do sistema radicular (MARCON et al., 2011). Após lavadas com água corrente para remoção do substrato, as raízes foram organizadas sobre placas acrílicas transparentes, cobertas por uma fina lâmina de água para facilitar o posicionamento e prevenir a sobreposição, prática também destacada por Silva et al. (2022).

O software realizou a medição automática dos seguintes parâmetros radiculares: comprimento total (cm), volume (cm³) e a distribuição de raízes por classe de diâmetro (faixas de 0,0–0,5 mm, 0,5–1,0 mm e 1,0–1,5 mm), com base na análise morfológica por imagem. Essas faixas indicam o nível de ramificação e absorção da muda, sendo as raízes mais finas (< 1 mm) mais ativas na absorção de água e nutrientes (Marcon et al., 2011; Rodrigues et al., 2020).

4.8.1. Interpretação - Crescimento da Parte Aérea via Análise Digital (WinRHIZO)

A área foliar representa a superfície total de todas as folhas de uma ou mais plantas e está diretamente ligada ao potencial fotossintético, à transpiração e trocas gasosas, sendo um dos principais indicadores do vigor vegetativo inicial (ESALQ/USP, 2023). Já a superfície aparente refere-se à face visível das folhas, captada pelo escaneamento e pode não refletir completamente a área real em casos de folhas com curvaturas ou ondulações. Assim, folhas planas possuem valores de área foliar e superfície aparente semelhantes, porém, folhas com curvaturas podem subestimar a real área de captação de luz (MANUTENÇÃO DRONES AGRÍCOLAS, 2023).

4.8.2. Interpretação - Crescimento das Raízes via Análise Digital (WinRHIZO)

Os parâmetros analisados do sistema radicular foram: comprimento total das raízes (cm), volume radicular (cm³) e a distribuição por classes de diâmetro (faixas de 0,0–0,5 mm, 0,5–1,0 mm e 1,0–1,5 mm).

4.9. Determinação da Matéria Fresca e Seca de Raízes e Folhas

Após a análise morfológica com o software WinRHIZO, foi determinada a massa de matéria fresca e seca das folhas e raízes das plântulas, visando avaliar o acúmulo de biomassa sob diferentes formulações de substrato.

Para a massa fresca foliar, as folhas foram colhidas, imediatamente identificadas e acondicionadas em sacos de papel previamente pesados e etiquetados. O conjunto (saco + etiqueta + folhas frescas) foi pesado em balança analítica, e o valor da matéria fresca foi obtido por diferença. As amostras foram então levadas à estufa de circulação forçada, mantida a 65 °C, por um período entre dois e três dias Almeida et al. (2011) e Castro et al. (2020), até atingirem massa constante. Após o resfriamento em dessecador, os sacos foram novamente pesados, e os valores de matéria seca foram calculados.

Para a determinação da biomassa radicular, as raízes previamente analisadas no WinRHIZO foram coletadas dos torrões, lavadas, acondicionadas em papel

toalha e imediatamente pesadas (massa fresca). Em seguida, também foram secas em estufa sob as mesmas condições até massa constante, e o valor da massa seca radicular foi obtido da mesma forma.

Os resultados foram obtidos por meio da equação:

$$Ms (\%) = \left(\frac{ms}{mf} \right) \times 100$$

(15)

Onde:

$Ms(\%)$ = matéria seca (em porcentagem, %),

ms = massa seca (em gramas, g),

mf = massa fresca (em gramas, g),

5. ANÁLISES QUÍMICAS

5.1. Determinação do pH dos Substratos

A determinação do pH foi realizada com o objetivo de caracterizar a acidez ou alcalinidade dos substratos utilizados na produção de mudas, parâmetro fundamental para a solubilização de nutrientes e o desempenho fisiológico das plântulas. O procedimento seguiu, com adaptações proporcionais, a metodologia oficial descrita na Instrução Normativa SDA nº 17, de 21 de maio de 2007 (BRASIL, 2007), que estabelece os métodos analíticos oficiais para análise de substratos e condicionadores de solos.

Inicialmente, os frascos plásticos utilizados na análise foram higienizados com água corrente e sabonete neutro, enxaguados com água deionizada em três etapas consecutivas e deixados secar à temperatura ambiente. Em seguida, as amostras foram preparadas com base na densidade previamente determinada de cada substrato, a fim de respeitar a proporção de 1:5 (v/v) substrato:água preconizada pela norma. Devido à limitação de volume dos recipientes utilizados no experimento, a alíquota teórica de 60 mL foi reduzida pela metade, resultando em um volume de 30 mL de substrato para cada amostra. A respectiva massa correspondente foi calculada a partir da densidade aparente e posteriormente ajustada com precisão

utilizando balança analítica nivelada e tarada. A água deionizada foi adicionada em proporção, totalizando 150 mL por amostra. As amostras foram então submetidas à agitação por 30 minutos, também proporcionalmente reduzido em relação à recomendação normativa de uma hora, visando garantir a homogeneidade da suspensão sem promover ruptura física do substrato. A determinação do pH foi realizada imediatamente após a agitação, com o uso de pHmetro digital calibrado previamente com soluções tampão de pH 4,00 e 7,00, conforme especificado pelo fabricante do equipamento. A leitura foi feita com o eletrodo imerso na suspensão, após estabilização do valor de pH, definida por variação inferior a 0,1 unidade durante 15 segundos. A temperatura da amostra foi aferida no momento da análise e registrada para controle, garantindo que não houvesse diferença superior a 1 °C entre as soluções tampão utilizadas na calibração e as amostras analisadas.

5.2.Determinação da Condutividade elétrica dos Substratos (CE)

A condutividade elétrica (CE) é um parâmetro de caracterização de substratos, sendo indicativa da concentração de sais solúveis presentes na solução do meio. Sua análise permite inferir sobre o risco de salinização e a disponibilidade de nutrientes para as plantas. Valores excessivos podem comprometer a germinação e o crescimento inicial das mudas, sobretudo em cultivos sensíveis. A metodologia adotada neste estudo baseou-se na Instrução Normativa SDA nº 17, de 21 de maio de 2007 (BRASIL, 2007). As amostras previamente utilizadas na determinação do pH foram aproveitadas para a análise de condutividade elétrica, o que permitiu a padronização do manejo e aproveitamento de recursos. As amostras foram coletadas de forma representativa, respeitando a proporção volumétrica de 1:5 (v/v), utilizando-se alíquotas de substrato equivalentes a 30 mL (metade da alíquota padrão de 60 mL, devido à capacidade dos frascos disponíveis). A massa correspondente foi calculada com base na densidade úmida previamente aferida para cada substrato.

As amostras foram transferidas para frascos limpos, previamente lavados com água e sabão neutro e enxaguados três vezes com água deionizada. Em seguida, foram adicionados 150 mL de água deionizada (metade do volume-padrão de 300 mL) e os frascos foram tampados e submetidos à agitação horizontal em agitador tipo Wagner, por uma hora, a 40 rpm. Após o período de extração, a

suspensão foi filtrada em papel faixa branca, descartando-se os primeiros 10 mL do filtrado, conforme recomendação normativa, a fim de evitar contaminação por partículas ou resíduos iniciais do processo.

A determinação da condutividade elétrica foi realizada com auxílio de condutivímetro digital, calibrado previamente com soluções padrão de KCl 0,01 mol/L (1,41 dS/m a 25 °C). O aparelho possuía correção automática de temperatura, e as leituras foram realizadas em dS/m, ajustadas à temperatura de 25 °C. Todos os procedimentos foram conduzidos em bancada com controle ambiental e sob iluminação indireta, a fim de evitar variações térmicas significativas.

5.3.Digestão para Análise de Nutrientes dos Substratos

A determinação do teor de nutrientes presentes nos substratos foi realizada por meio de digestão úmida assistida, utilizando sistema de tubos de Teflon, conforme protocolo adaptado de Binder et al. (2007), da Embrapa Solos. Esse método é amplamente utilizado para a preparação de amostras ricas em matéria orgânica, como é o caso de substratos orgânicos ou formulados, pois permite a extração eficiente dos elementos minerais após a completa oxidação da fração orgânica.

Inicialmente, cada amostra foi pesada entre 0,200 g e 0,250 g em balança de precisão, sendo transferida cuidadosamente para tubos de Teflon limpos e identificados. A pesagem foi feita diretamente nos recipientes de digestão para evitar perdas e garantir maior exatidão. A escolha dessa faixa de massa se baseou na quantidade adequada para garantir uma digestão eficiente, sem saturação dos reagentes, considerando a alta carga orgânica dos materiais. Foram adicionadas inicialmente 3 mL de ácido nítrico (HNO_3) concentrado, seguidas de 1 mL de ácido clorídrico (HCl), totalizando uma proporção de 3:1 (v/v). Essa primeira etapa foi realizada com o objetivo de iniciar a oxidação da matéria orgânica mais reativa. Após repouso e observação da reação inicial, foi realizada uma segunda adição, ampliando-se o volume para 9 mL de HNO_3 e 3 mL de HCl, completando a proporção de 9:3 (v/v), conforme sugerido por Binder et al. (2007) para materiais com elevado teor de compostos orgânicos, como substratos de cultivo. A escolha de aplicar o ácido nítrico como reagente principal deve-se à sua capacidade oxidante, promovendo a decomposição de substâncias orgânicas e liberando os elementos

minerais em solução. Já o HCl atua na solubilização de certos sais e contribui para a digestão completa da amostra. Os tubos foram então fechados e levados ao sistema de digestão por micro-ondas, seguindo as condições de tempo, temperatura e pressão indicadas no protocolo de segurança do equipamento.

Como controle de qualidade analítica, foram preparadas três amostras brancas (sem substrato) para verificação de contaminação, e foi utilizado o material de referência certificado NIST 1646a (Sediment), amplamente reconhecido por sua estabilidade e composição conhecida, garantindo a confiabilidade dos dados obtidos. Ao final da digestão, as soluções foram filtradas, acondicionadas em frascos plásticos previamente lavados com HCl 10% e enxaguados com água deionizada, sendo posteriormente analisadas para quantificação dos nutrientes por ICP-OES (Espectrometria de Emissão óptica com Plasma Indutivamente Acoplado), conforme estrutura disponível no laboratório.

6. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DAS ANÁLISES FÍSICAS

6.1. Umidade Atual dos Substratos - Resultados

A Tabela 1 resume os valores médios de umidade (% m/m) obtidos para cada substrato, com quatro repetições:

TABELA 1 – Valores médios, em porcentagem, de umidade.

Componente	Umidade média (%)
Comercial	56,90
Poliacrilamida	24,16
Psyllium	24,43
Controle	23,98
Vermiculita	23,91
Biochar de Bambu	24,20
Bentonita	21,71

FONTE: O autor (2025).

O substrato Carolina Soil® (comercial), apresentou a maior umidade média (56,9%), indicando maior retenção hídrica, possivelmente relacionada à sua composição com elevada proporção de partículas finas e materiais altamente higroscópicos (FERMINO, 2002; KÄMPF, 2005). Em contraste, os demais substratos formulados apresentaram umidade média entre 21% e 25%, com destaque para a bentonita, que apresentou os menores valores médios. Essa diferença sugere uma estrutura

mais porosa ou menos hidrorretentora, o que pode beneficiar aeração, mas exigir maior frequência de irrigação.

6.2.Densidade Aparente dos Substratos - Resultados

A Tabela 2 resume os valores médios de densidade úmida (kg/m³) e densidade seca (kg/m³) obtidos para cada substrato, com quatro repetições:

TABELA 2 – Valores médios de Densidade úmida e Densidade seca.

Componente	Densidade úmida (kg/m³)	Densidade seca (kg/m³)
Comercial	329,91	143,23
Poliacrilamida	562,39	426,49
Psyllium	487,80	368,61
Controle	552,79	420,27
Vermiculita	535,12	407,18
Biochar de Bambu	574,28	435,39
Bentonita	619,92	485,32

FONTE: O autor (2025).

6.3.Avaliação Física das Bancadas para cultivo de Mudass

TABELA 3 – Propriedades físicas e mecânicas dos materiais utilizados no dimensionamento das bancadas.

Material	Espessura do material (metros)	Densidade do material (kg/m³)	Módulo da elasticidade do material (GPa)
Madeira (pinus)	0,05	500	9
Aço galvanizado	0,003	7850	200
Concreto armado	0,08	2500	25
Plástico PEAD	0,005	1400	7
Fibra de vidro PRFV	0,006	2010	24

FONTE: O autor (2025).

TABELA 4 – Análise estrutural de materiais para bancadas de cultivo de mudass.

Material	Carga Total (N/m)	σ (MPa)	Deformação da Flecha (mm)	Limite (mm)	Situação
Madeira (pinus)	383,37	0,64	2,18	7,5	Aceita
Aço galvanizado	364,89	170,51	431,63	7,5	Não Aceita
Concreto armado	2612,87	1,17	1,30	7,5	Aceita
Plástico PEAD	154,05	25,91	1124,56	7,5	Não Aceita
Fibra de vidro PRFV	218,51	25,52	269,24	7,5	Não Aceita

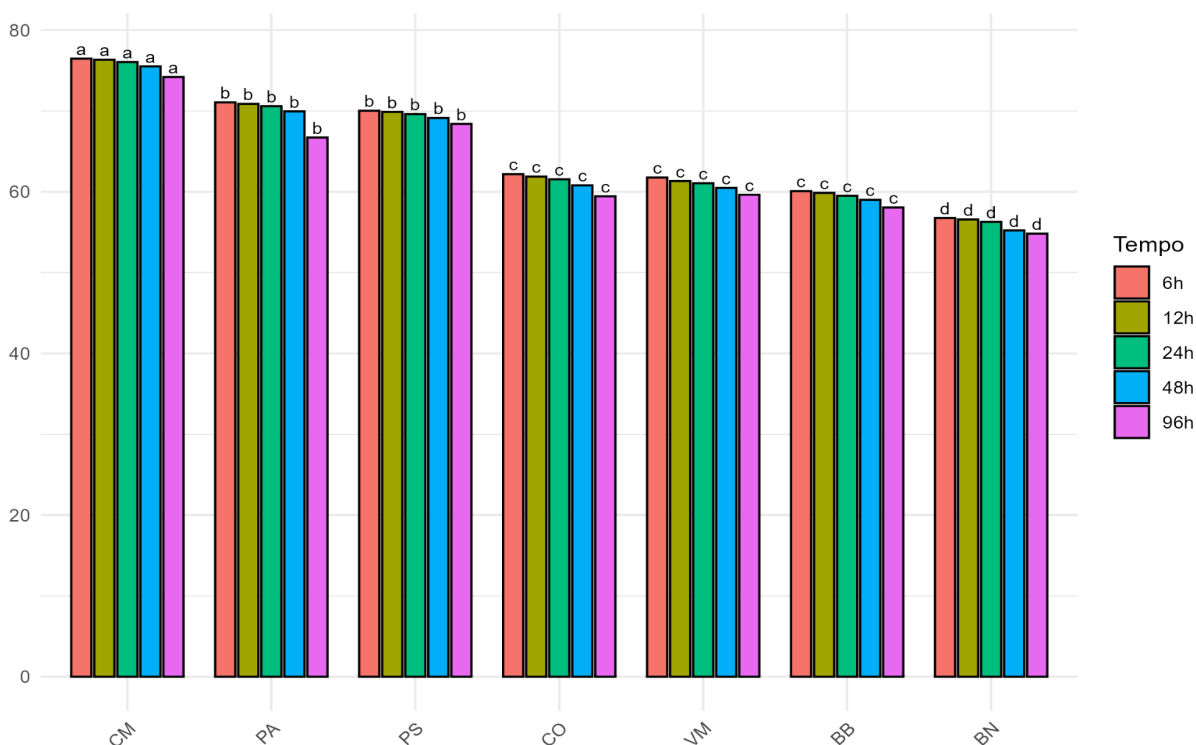
FONTE: O autor (2025).

Com base nas propriedades físicas e mecânicas apresentadas na Tabela 3, foi realizada uma análise comparativa dos materiais utilizados para o dimensionamento estrutural das bancadas de cultivo. As análises descritas na Tabela 4 demonstram que a madeira de pinus, com espessura de 5 cm, apresentou tensão de flexão de 0,64 MPa e deformação de 2,18mm, ficando dentro do limite aceitável de 7,5mm conforme a norma ABNT NBR 6118 (2014), sendo classificada como aceita. Já o aço galvanizado, mesmo com elevada resistência mecânica apresentou flecha de 431,63 mm, necessitando de reforço extra intermediário. O concreto armado, com espessura de 8 cm, resultou em deformação de 1,30 mm e tensão de flexão de 1,17 MPa, indicando que o material atende aos critérios normativos tanto em relação à resistência quanto à deformidade. O plástico PEAD apresentou flecha de 1124,56mm, inviabilizando seu uso estrutural. Por fim, a fibra de vidro PRFV apresentou flecha de 269,34 mm e tensão de 25,52 MPa, o que sugere reforço estrutural.

Conclui-se que somente a madeira de Pinus tratada atende simultaneamente aos critérios de tensão e deformação. No entanto, por apresentar menor durabilidade em ambientes úmidos, a proposta final sugere o uso de estrutura reforçada para as bancadas em aço galvanizado e em fibra de vidro PRFV, garantindo estabilidade pela robustez e resistência.

6.4.Retenção de Água ao longo do Tempo - Resultados

GRÁFICO 1 – Média da porcentagem de umidade retida nos substratos ao longo do tempo (6h, 12h, 24h, 48h, 96), considerando quatro repetições para cada tratamento.



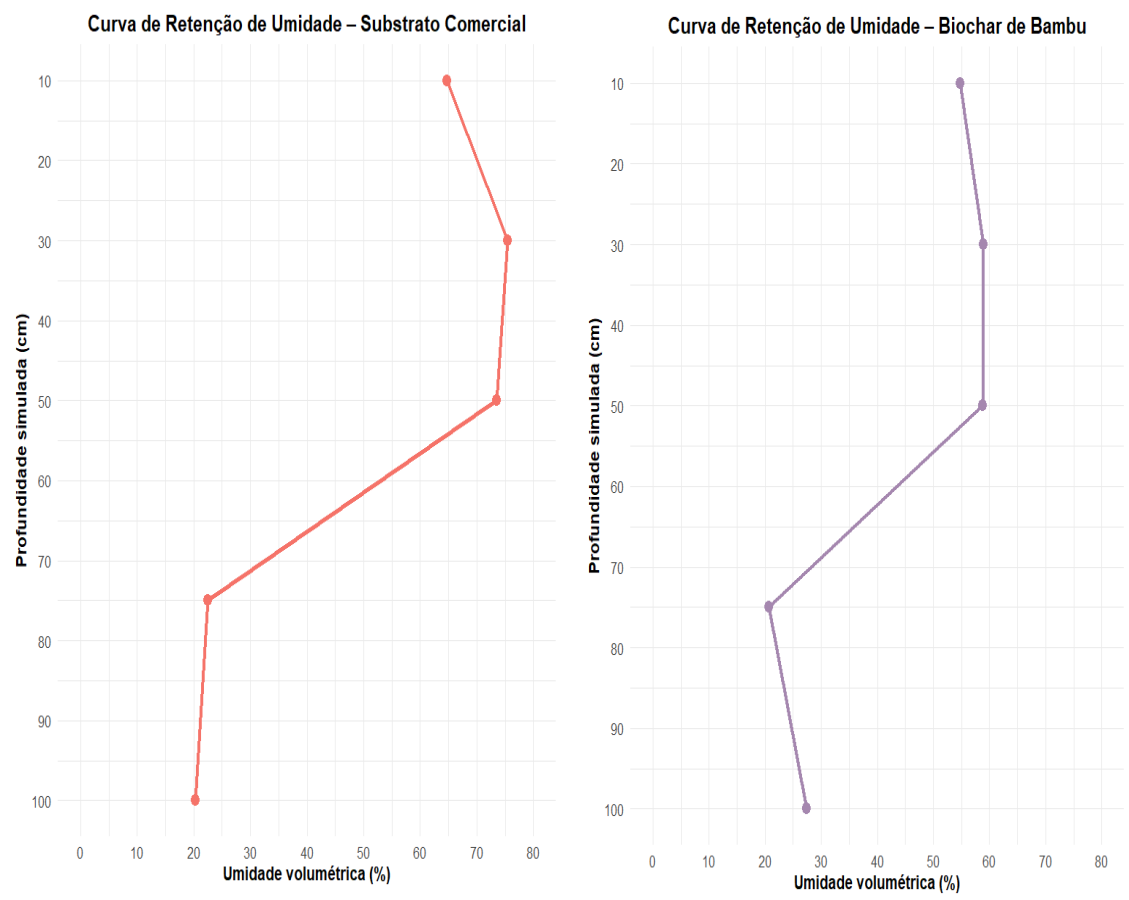
FONTE: O autor (2025).

O substrato comercial (CM) destacou-se, apresentando a maior porcentagem de retenção de água (74,21% a 76,48%) durante as 96 h de análise, seguido pelos tratamentos com poliacrilamida (PA) e psyllium (PS), os quais não diferiram entre si (66,72% a 71,07%). Os tratamentos controle (CO), vermiculita (VM) e biochar de bambu (BB) formaram um grupo com capacidade intermediária (59,45% a 61,89%) de retenção de água. O substrato com bentonita (BN) apresentou a menor retenção (54,82% a 56,76%), embora esse valor ainda seja elevado, considerando que o substrato seria capaz de reter aproximadamente 56% da água aplicada após 96 h do último evento de irrigação. Mazero(2023) ressalta que substratos enriquecidos com condicionadores orgânicos podem melhorar a disponibilidade hídrica e a retenção de umidade ao longo do tempo.

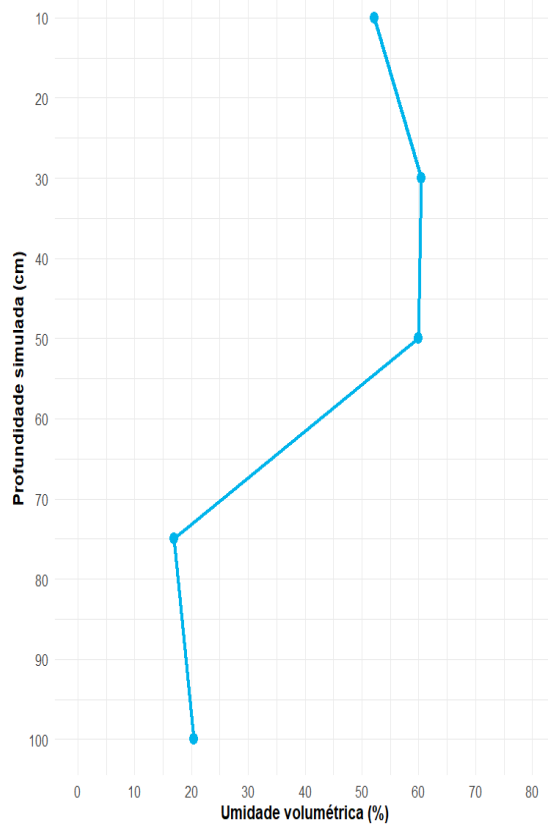
6.5.Capacidade de Retenção de Água (CRA_{10}) - Resultados

O gráfico 2 representa a capacidade de retenção de água, para diferentes tensões aplicadas e foram construídos utilizando o software R (versão 4.4.1; R Core Team, 2025). Observou-se que o substrato Comercial (CM) apresentou maiores valores de CRA em 10 cm (59,37%) e 30 cm (69,20%), evidenciando alta retenção inicial, porém com maiores profundidades sua retenção diminui indicando baixa disponibilidade de água. Por outro lado os substratos Poliacrilamida e Psyllium demonstraram retenção mais estável ao longo das tensões, sugerindo melhor capacidade de fornecer água ao sistema radicular. Esse comportamento é desejado em substratos, pois favorece a disponibilidade contínua de água sem provocar saturação superficial nem ressecamento precoce em profundidade (COSTA et al., 2014; GOMES et al., 2018).

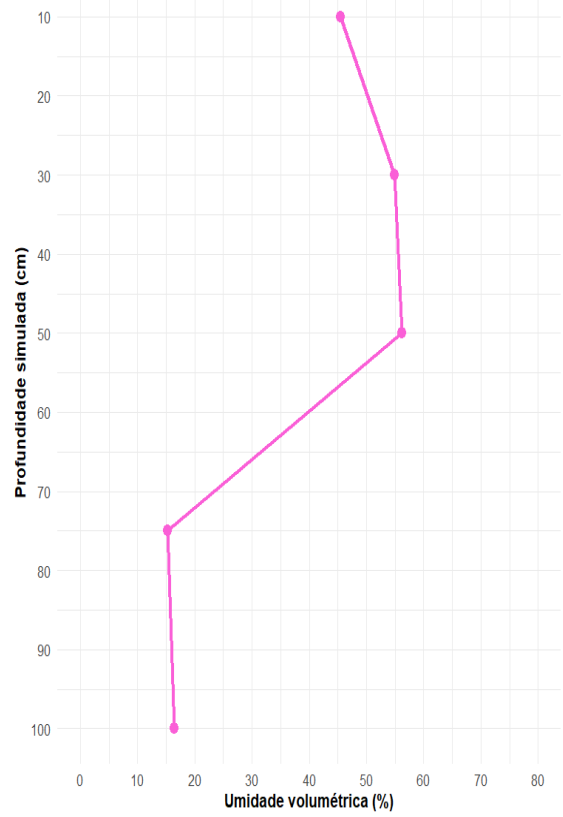
GRÁFICO 2 – Curvas de Retenção de Umidade dos Substratos.



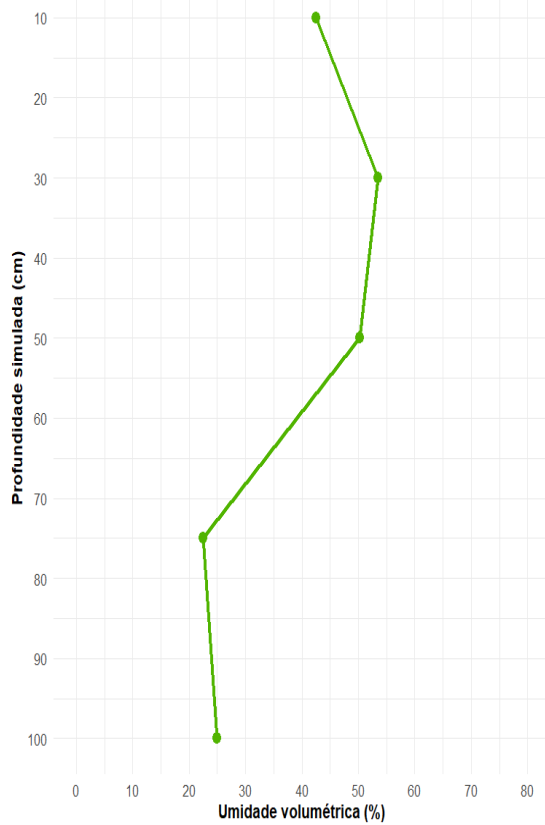
Curva de Retenção de Umidade – Substrato Vermiculita



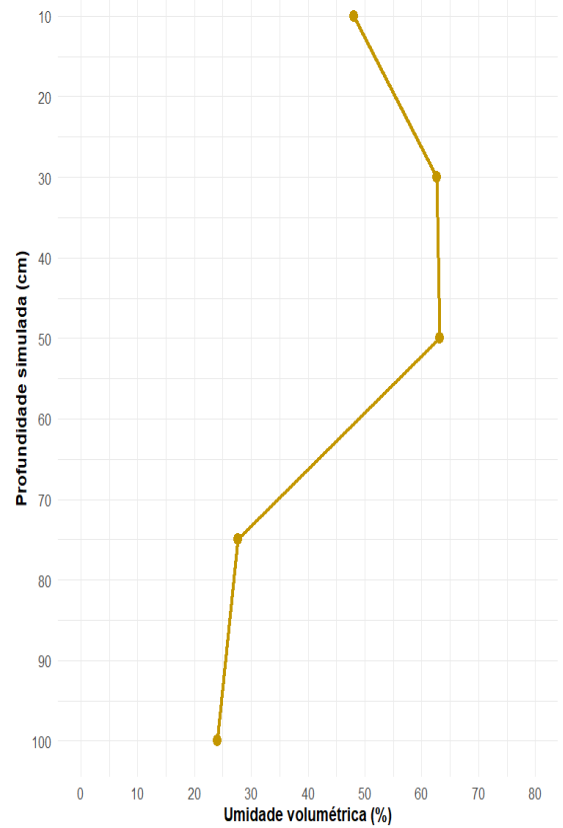
Curva de Retenção de Umidade – Bentonita



Curva de Retenção de Umidade – Psyllium



Curva de Retenção de Umidade – Poliacrilamida



FONTE: O autor (2025).

6.6.Avaliação da Integridade do Torrão - Resultados

A tabela 5 apresenta as médias e desvios padrão das notas atribuídas, organizadas por substrato e frequência de irrigação. O número de amostras por grupo variou conforme perdas ocasionais.

TABELA 5 – Média das Notas atribuídas aos substratos por regime de irrigação (com desvio amostral).

Componente	Nota Média (1x)	Desvio	Nota média (2x)	Desvio	Nota Média (3x)	Desvio
Comercial	8	3,2	8	3,0	8	3,3
Poliacrilamida	6	3,4	8	3,3	9	3,3
Psyllium	5	3,1	7	3,8	9	2,4
Controle	3	1,8	6	0,9	10	1,8
Vermiculita	4	3,7	7	2,8	7	0,8
Biochar de Bambu	3	2,6	7	2,5	9	2,9
Bentonita	6	3,6	6	3,3	9	1,3

FONTE: O autor (2025).

Os dados revelaram diferenças significativas entre os substratos e as lâminas de irrigação. Substratos como CO (Controle), PA (Poliacrilamida) e CM (Comercial) obtiveram as maiores notas, com menor variabilidade, indicando boa coesão estrutural dos torrões mesmo com aumento da frequência de irrigação. Substratos como PS (Psyllium) e BB (Biochar de bambu) apresentaram menores médias e maiores desvios, sugerindo menor estabilidade e maior risco de desmanche durante o manuseio. No PS, a melhora das notas com irrigação 3x evidencia que a umidade favorece a aderência entre partículas, como também descrito por Lopes et al. (2020). A escala adotada, além de ampliar a sensibilidade da avaliação em relação às escalas anteriores (FERREIRA et al., 2007; MARTINAZZO et al., 2021), oferece base para análises quantitativas e pode ser aplicada tanto em pesquisa quanto em viveiros comerciais.

6.7.Ensaio de Queda de Torrão - Resultados

Os resultados obtidos a partir da equação de perda de massa, estão representados na Tabela 6 por lâmina de irrigação.

TABELA 6 – Perda de massa (%) dos torrões após a queda, por substrato e regime de irrigação.

Componente	Perda de Massa Média (1x)	Perda de Massa Média (2x)	Perda de Massa Média (3x)
Comercial	37%	14%	21%
Poliacrilamida	56%	27%	13%
Psyllium	75%	26%	23%
Controle	75%	47%	12%
Vermiculita	69%	42%	25%
Biochar de Bambu	81%	39%	20%
Bentonita	55%	49%	23%

FONTE: O autor (2025).

A perda de massa após a queda do torrão é um indicador direto da coesão física do substrato ao redor do sistema radicular. Quanto menor a perda, maior a integridade estrutural do bloco, característica essencial para o sucesso no transplante e na adaptação das mudas em campo (FERREIRA et al., 2007; EMBRAPA, 2015). Seguindo esse princípio o substrato Comercial (CM), apresentou o menor percentual de perda nas lâminas 1 e 2 de irrigação, enquanto os substratos Controle (CO) e Poliacrilamida (PA), apresentaram os menores percentuais de perda de massa no terceiro regime de irrigação. Considerando a umidade juntamente com a perda de massa o substrato Comercial (CM) se destaca por ter elevada umidade (56,60%) e poucas perdas, o que demonstra boa integridade (como provada anteriormente).

Por outro lado, substratos como Biochar (BB), Vermiculita (VM) e Psyllium (PS), apesar de terem teores de umidade próximos (23% e 24%), apresentam perdas de massa maiores, especialmente no regime de uma irrigação diária demonstrando que a umidade sozinha não consegue garantir a coesão do torrão, sendo necessária uma estrutura física mais estável e interação adequada entre partículas e raízes. Segundo Kämpf (2005), a resistência física do torrão depende não apenas da retenção hídrica, mas também da porosidade, granulometria e estabilidade das ligações mecânicas entre o substrato e o sistema radicular.

6.8. Análise Morfológica de Raízes e folhas via WinRHIZO - Resultados

6.8.1. Interpretação - Crescimento da Parte Aérea via Análise Digital (WinRHIZO)

TABELA 7 – Área Foliar (AF) e Superfície Aparente (SA) por planta, substrato e regime de irrigação.

Componente	AF (cm ²) (1x)	SA (cm ²) (1x)	AF (cm ²) (2x)	SA (cm ²) (2x)	AF (cm ²) (3x)	SA (cm ²) (3x)
Comercial	4	13	4	11	4	13
Poliacrilamida	22	68	29	91	131	103
Psyllium	21	67	22	70	164	86
Controle	14	43	23	46	72	82
Vermiculita	19	60	32	120	40	124
Biochar de Bambu	17	53	27	83	37	115
Bentonita	25	80	28	75	50	167

FONTE: O autor (2025).

Os dados da Tabela 7 mostram que o substrato Bentonita (BN) apresentou os maiores valores de área foliar (AF) e superfície aparente (SA) no regime de irrigação 1x, demonstrando que a planta se desenvolveu mesmo com a baixa quantidade de água. Já nos regimes mais intensos (2x e 3x), os substratos Psyllium (PS) e Poliacrilamida (PA) passaram a apresentar os melhores resultados, especialmente no caso da AF no regime 3x. Por outro lado, o substrato Comercial (CM) teve os menores valores para ambos os parâmetros em todos os regimes avaliados. Para uma melhor visualização dos dados, vide Apêndice – Gráficos 10 e 11, que ilustram, respectivamente, os resultados de área foliar por planta (AF) e superfície aparente por planta (SA).

6.8.2. Interpretação - Crescimento das Raízes via Análise Digital (WinRHIZO)

TABELA 8 – Comprimento, Volume e Distribuição de raízes por classes de diâmetro por planta, substrato e regime de irrigação.

Componente	Irrigação	Comprimento (cm)	Volume Radicular (cm ³)	0 < D ≤ 0,5 mm	0,5 < D ≤ 1,0 mm	1,0 < D ≤ 1,5 mm
Comercial	1x	154,84	0,13	137,51	11,87	3,79
	2x	130,95	0,13	114,22	11,60	2,51
	3x	92,64	0,09	80,68	7,67	2,06
Poliacrilamida	1x	83,93	0,13	69,54	9,41	1,78
	2x	147,37	0,27	116,44	19,23	5,29
	3x	177,64	0,38	140,56	22,36	5,36
Psyllium	1x	109,86	0,19	87,09	15,96	2,50
	2x	221,48	0,48	173,51	28,04	7,67

Componente	Irrigação	Comprimento (cm)	Volume Radicular (cm³)	0 < D ≤ 0,5 mm	0,5 < D ≤ 1,0 mm	1,0 < D ≤ 1,5 mm
	3x	108,70	0,28	83,99	13,68	3,44
Controle	1x	91,10	0,14	75,80	8,77	2,24
	2x	118,79	0,20	96,62	11,97	4,30
	3x	137,88	0,30	107,41	18,50	4,50
Vermiculita	1x	67,71	0,11	55,61	7,79	1,55
	2x	101,60	0,22	79,36	12,70	3,64
	3x	100,25	0,22	78,87	13,06	3,01
Biochar de Bambu	1x	94,14	0,16	74,13	12,29	2,88
	2x	147,01	0,24	119,68	16,90	3,99
	3x	140,25	0,24	112,24	18,64	3,74
Bentonita	1x	81,71	0,15	65,64	10,48	0,81
	2x	105,44	0,17	86,37	11,59	2,76
	3x	142,20	0,42	108,82	18,12	4,97

FONTE: O autor (2025).

Os dados obtidos revelam que o substrato comercial (CM) apresentou os maiores valores de comprimento total e volume radicular nas três frequências de irrigação. Dentre os formulados, o Poliacrilamida (PA) teve desempenho próximo ao comercial com crescimento progressivo em todos os regimes de irrigação. Já os substratos Vermiculita (VM) e Psyllium (PS) também apresentaram bom desempenho em dois dos três regimes, com resposta no volume. Em contrapartida, Bentonita (BN) e Biochar de Bambu (BB) mostraram valores inferiores enquanto o Controle (CO) teve crescimento limitado, especialmente no primeiro regime de irrigação.

A distribuição do diâmetro radicular foi concentrada, na classe $0 < D \leq 0,5$ mm, decrescendo nas demais classes. Para melhor visualização dos dados vide Apêndice - Gráficos 12 e 13 (Comprimento e volume radicular), 14, 15 e 16 (Distribuição de diâmetros por classe).

6.9. Matéria Fresca e Seca de Raízes e Folhas - Resultados

Os resultados estão expressos nas tabelas 9 e 10:

TABELA 9 – Matéria seca (%) das folhas após secagem em estufa, por substrato e regime de irrigação.

Componente	Matéria Seca Média (1x)	Matéria Seca Média (2x)	Matéria Seca Média (3x)
Comercial	0,00%	0,94%	0,00%
Poliacrilamida	5,15%	8,13%	10,87%
Psyllium	4,63%	7,64%	9,54%

Controle	3,65%	6,66%	9,72%
Vermiculita	4,46%	7,92%	8,75%
Biochar de Bambu	3,75%	6,71%	9,01%
Bentonita	4,93%	6,41%	8,36%

FONTE: O autor (2025).

TABELA 10 – Matéria seca (%) das raízes após secagem em estufa, por substrato e regime de irrigação.

Componente	Matéria Seca Média (1x)	Matéria Seca Média (2x)	Matéria Seca Média (3x)
Comercial	3,87%	4,09%	4,66%
Poliacrilamida	6,18%	6,76%	6,59%
Psyllium	5,41%	5,04%	5,48%
Controle	6,39%	6,00%	5,19%
Vermiculita	6,85%	5,40%	4,79%
Biochar de Bambu	5,50%	5,58%	5,50%
Bentonita	5,74%	4,89%	5,07%

FONTE: O autor (2025).

A matéria seca é um indicador direto do acúmulo de biomassa pelas plantas, refletindo a eficiência do substrato em fornecer suporte físico, água e nutrientes. De acordo com Silva et al. (2011), maiores teores de matéria seca indicam maior capacidade fotossintética e desenvolvimento morfofisiológico satisfatório, sendo um parâmetro relevante para comparar diferentes ambientes de cultivo ou formulações de substratos.

Na massa seca da parte aérea (folhas), os maiores valores absolutos foram observados nos tratamentos com Poliacrilamida (PA), Bentonita (BN) e Vermiculita (VM), variando conforme o regime de irrigação. No entanto, ao considerar a perda de matéria seca após a secagem, o substrato com Poliacrilamida (PA) foi o que apresentou as maiores perdas em todos os regimes de irrigação, indicando maior proporção de água nas folhas ou menor densidade tecidual.

Quanto à massa seca das raízes, o substrato com Vermiculita (VM) apresentou a maior perda no regime com irrigação uma vez ao dia (1x), enquanto o tratamento com Poliacrilamida (PA) teve as maiores perdas nos regimes com duas e três irrigações diárias (2x e 3x), sugerindo uma estrutura radicular mais suscetível à desidratação ou colapsos estruturais.

Por outro lado, o substrato comercial (CM), que apresentou os menores valores absolutos de matéria seca para folhas e raízes em todos os regimes de irrigação, também foi o que perdeu menos massa seca relativa, indicando menor produção de biomassa, mas possivelmente tecidos mais compactos ou menos hidratados.

7.APRESENTAÇÃO E RESULTADOS DAS ANÁLISES QUÍMICAS

7.1.pH dos Substratos - Resultados

Todos os valores de pH foram anotados com precisão de uma casa decimal e suas médias estão descritas na Tabela 11.

TABELA 11 – Valores médios de pH e Temperatura (°C), por substrato.

Componente	pH	Temperatura (°C)
Comercial	6,32	22,40
Poliacrilamida	5,99	22,50
Psyllium	6,26	22,43
Controle	6,20	22,43
Vermiculita	6,33	22,28
Biochar de Bambu	6,31	22,40
Bentonita	6,38	22,33

FONTE: O autor (2025).

A análise do pH indicou que todos os substratos se mantiveram dentro da faixa adequada para a produção de mudas, variando entre 5,99 e 6,38. O substrato com poliacrilamida apresentou menor valor, enquanto com bentonita teve maior pH (6,38). Os demais tratamentos apresentaram variações discretas. Para o cultivo do tomate, a literatura recomenda uma faixa ideal de pH entre 5,5 e 6,2, intervalo no qual há maior disponibilidade de fósforo, cálcio, magnésio e outros elementos essenciais (LOPES et al., 2020). Dentre os substratos avaliados, apenas o Controle (6,20) e a Poliacrilamida (5,99) apresentaram valores de pH compatíveis com essa faixa ideal. Por outro lado, os demais substratos apresentaram valores de pH acima da faixa recomendada, com destaque para a Bentonita (6,38), Vermiculita (6,33), Carolina Soil (6,32), Biochar (6,31) e Psyllium (6,26). Embora os desvios não sejam extremos, valores mais alcalinos podem comprometer a absorção de micronutrientes como ferro, manganês e zinco.

7.2.Conductividade elétrica dos Substratos (CE) - Resultados

Todos os valores foram anotados com precisão de uma casa decimal e suas médias estão descritas na Tabela 12.

TABELA 12 – Valores médios de Condutividade Elétrica (CE), Temperatura (°C) e Interpretação indicativa por substrato.

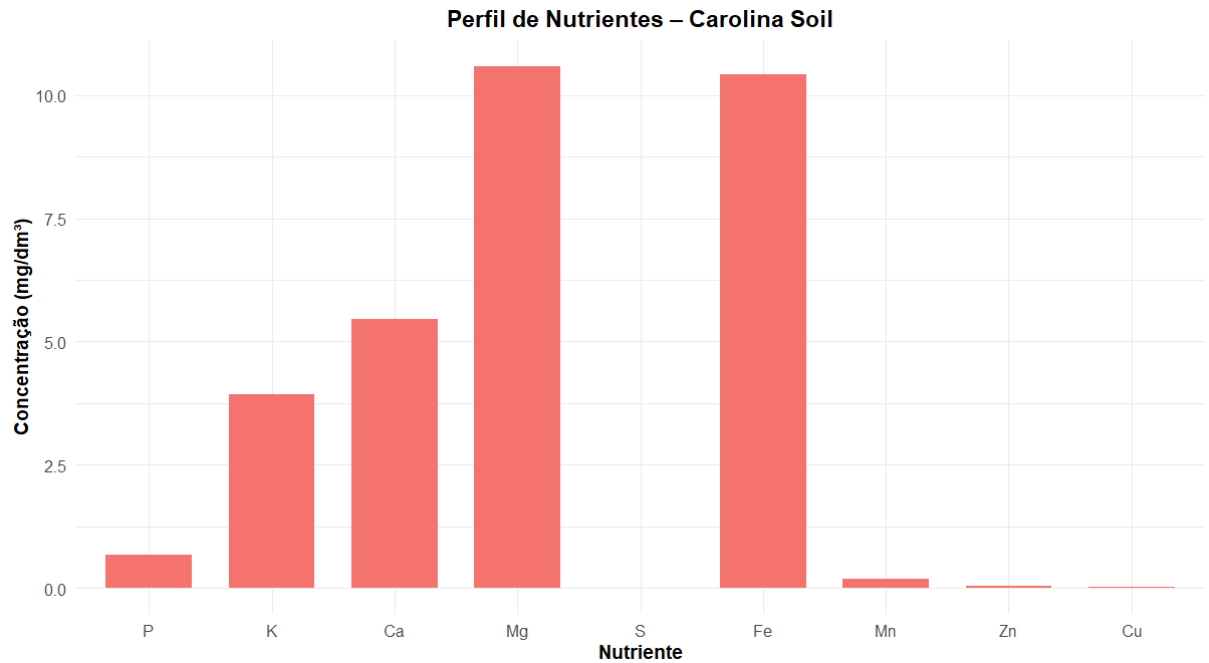
Componente	CE (dS/m)	Temperatura (°C)	Indicação
Comercial	0,22	21,70	Baixo
Poliacrilamida	5,38	21,55	Extremo
Psyllium	4,86	21,50	Extremo
Controle	6,18	21,63	Extremo
Vermiculita	6,05	21,40	Extremo
Biochar de Bambu	6,41	21,43	Extremo
Bentonita	5,79	21,40	Extremo

FONTE: O autor (2025).

Os valores de condutividade elétrica (CE) foram interpretados com base nos intervalos propostos por Cavins et al. (2000) (ver Anexo 1). Os resultados indicam que, exceto o substrato Comercial (0,22 dS/m), todas as formulações apresentam níveis considerados extremos, apontando uma condição potencialmente tóxica.

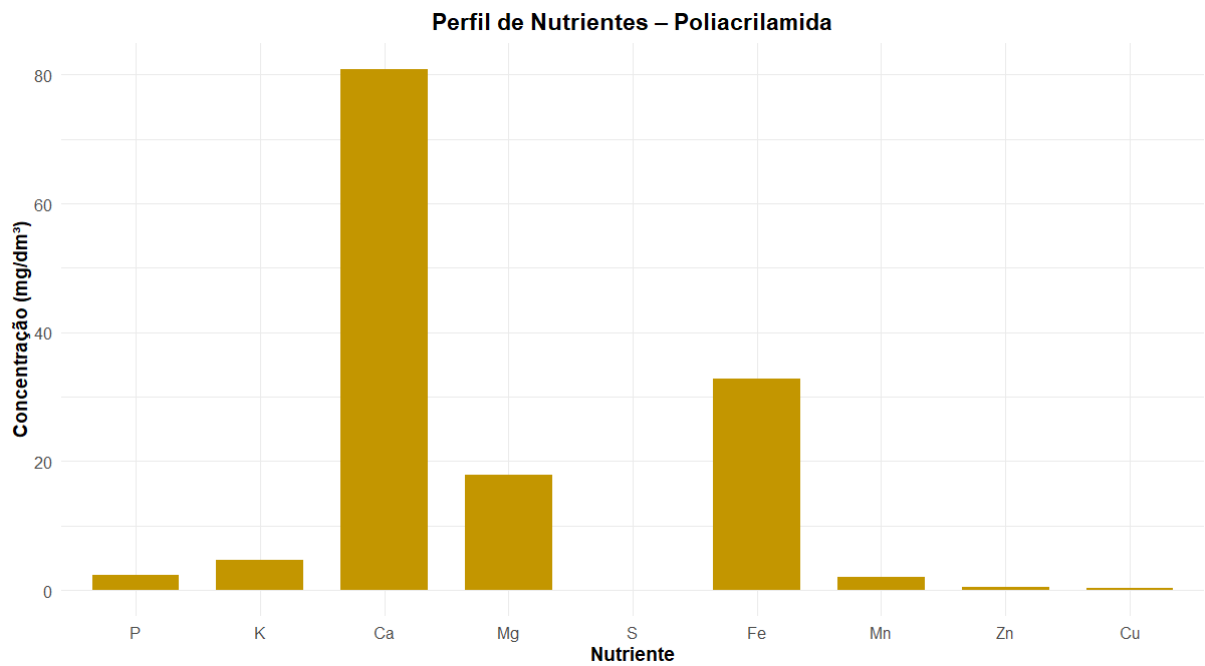
7.3.Digestão para Análise de Nutrientes dos Substratos- Resultados

GRÁFICO 3 – Perfil de Nutrientes no Substrato com Carolina Soil.



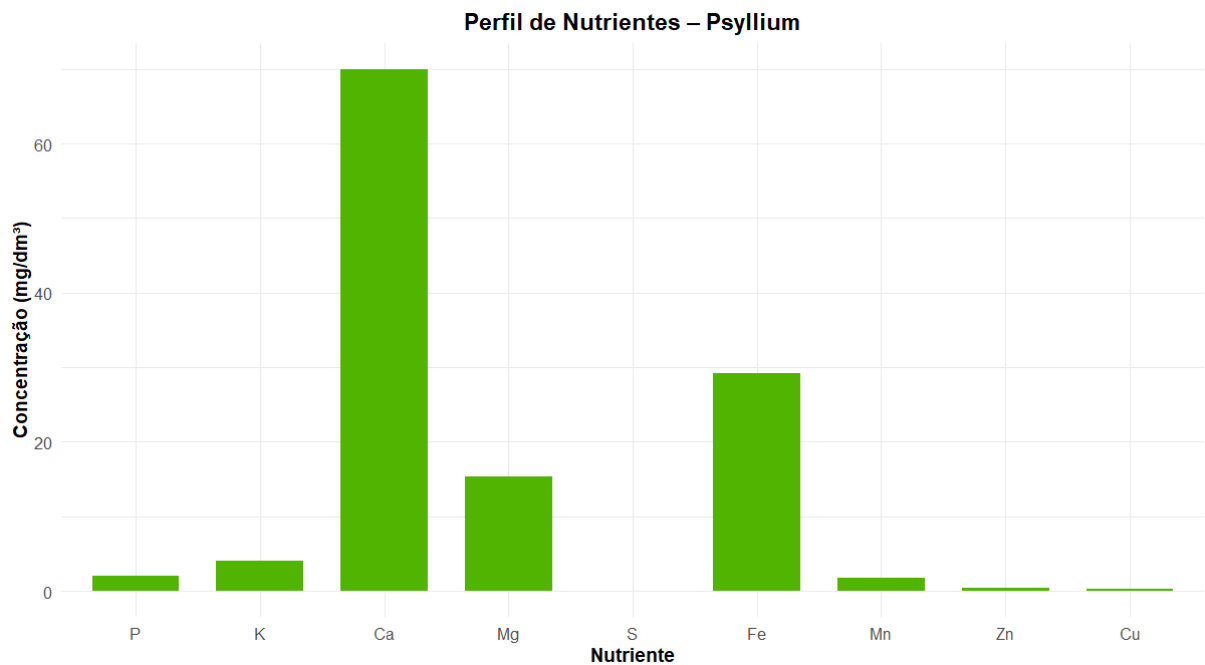
FONTE: O autor (2025).

GRÁFICO 4 – Perfil de Nutrientes no Substrato com Poliacrilamida.



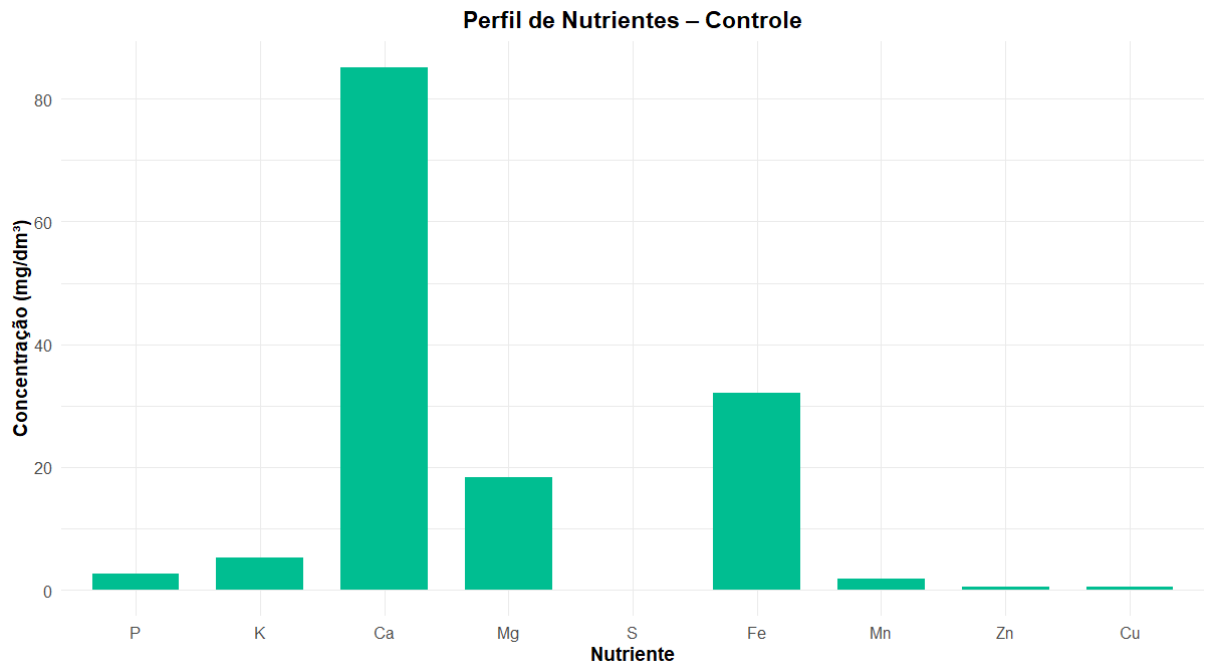
FONTE: O autor (2025).

GRÁFICO 5 – Perfil de Nutrientes no Substrato com Psyllium.



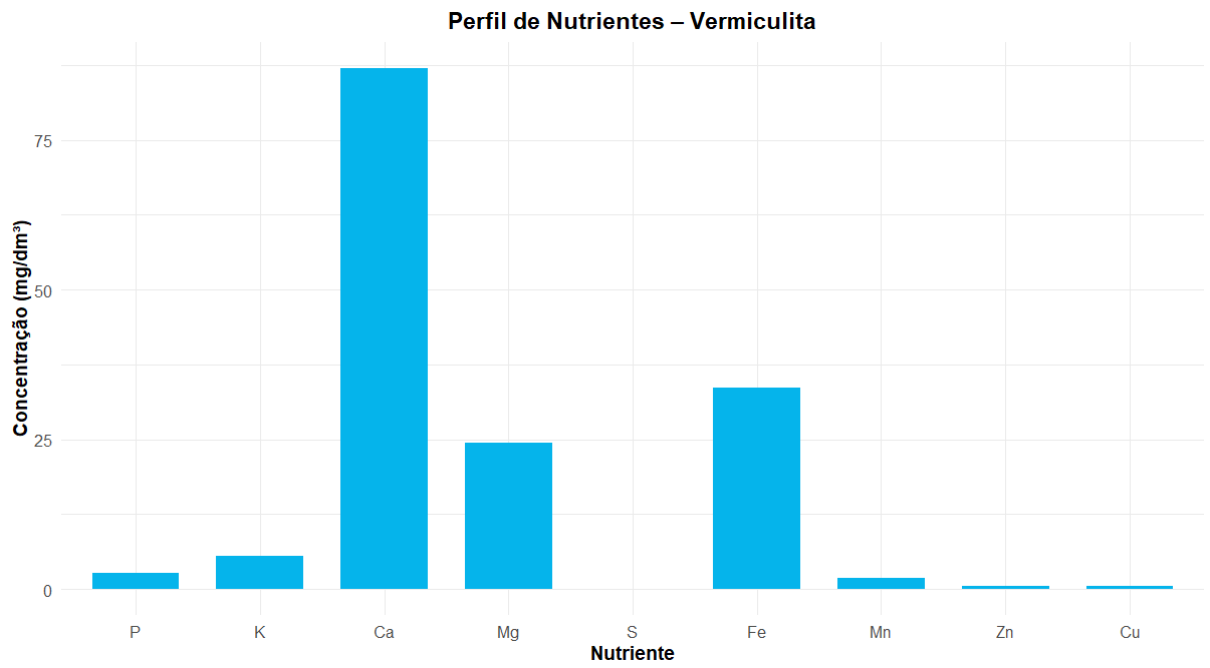
FONTE: O autor (2025).

GRÁFICO 6 – Perfil de Nutrientes no Substrato com Controle.



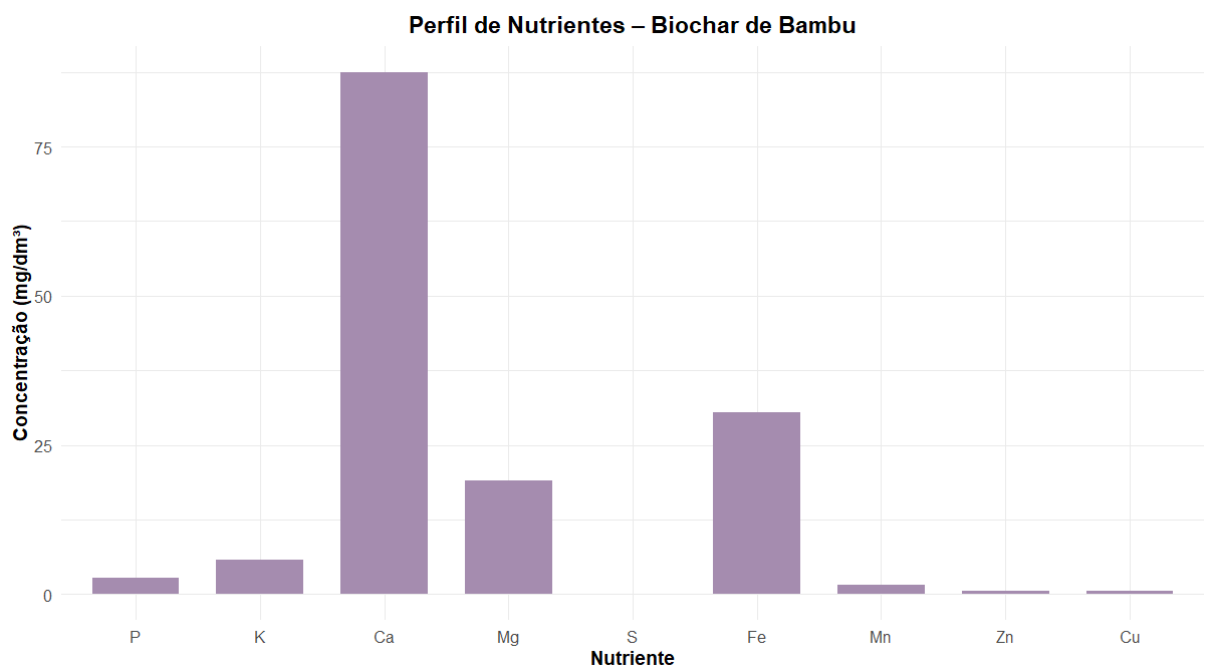
FONTE: O autor (2025).

GRÁFICO 7 – Perfil de Nutrientes no Substrato com Vermiculita.



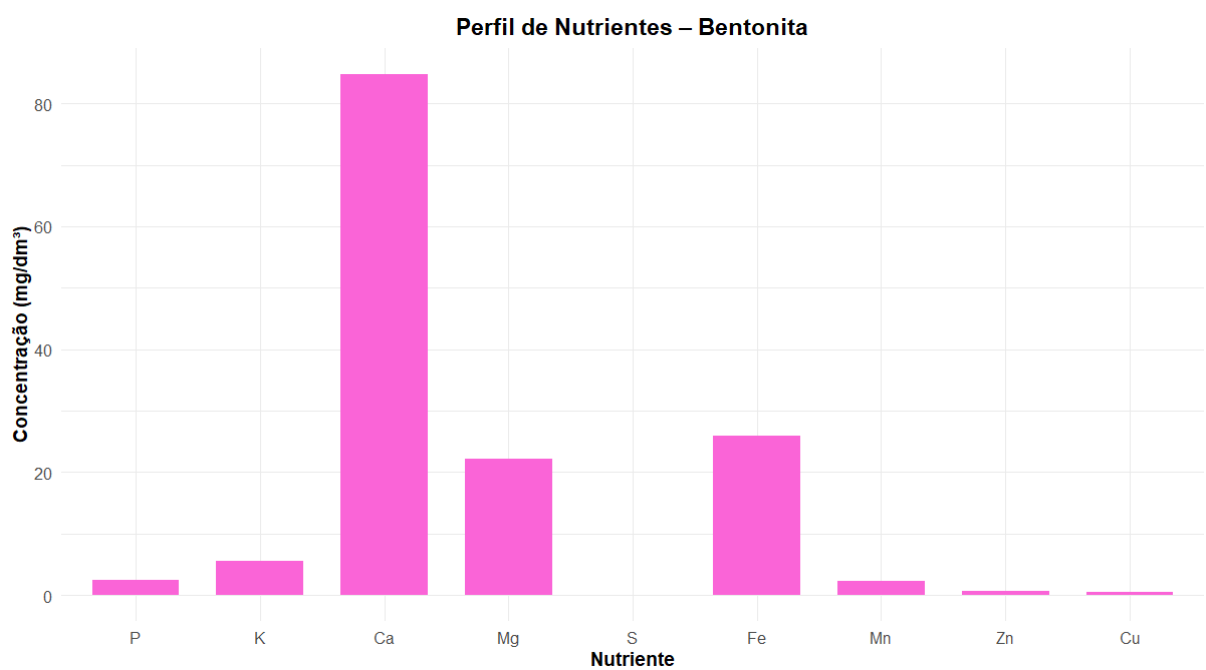
FONTE: O autor (2025).

GRÁFICO 8 – Perfil de Nutrientes no Substrato com Biochar de Bambu.



FONTE: O autor (2025).

GRÁFICO 9 – Perfil de Nutrientes no Substrato com Bentonita.



FONTE: O autor (2025).

Os níveis de Enxofre (S), Fósforo (P), Manganês (Mn), Zinco (Zn) e Cobre (Cu) apresentaram pouca variação entre os substratos, mantendo-se em níveis baixos e relativamente constantes. Por outro lado, elementos como Potássio (K), Ferro (Fe) e Cálcio (Ca) demonstraram variações mais significativas.

O Potássio (K) apresentou os valores mais elevados no substrato Comercial (CM) (5,6 mg/dm³) e no Controle (CO) (5,2 mg/dm³), o que pode indicar maior capacidade de troca catiônica (SEGURA, 2025). O Ferro (Fe) também teve destaque no substrato Comercial, com a maior concentração registrada (10,47 mg/dm³).

O Cálcio (Ca) esteve presente em alta concentração em todos os substratos, com ênfase no substrato Poliacrilamida (PA), que apresentou um dos maiores teores (87 mg/dm³). O Magnésio (Mg), por sua vez, manteve níveis próximos entre os substratos, com leves variações.

Considerando que todos os substratos, exceto o comercial, partiram de uma mesma base, as variações observadas podem ser atribuídas às interações entre os materiais constituintes dos substratos e os nutrientes presentes, afetando a disponibilidade dos elementos. Fatores como adsorção em superfícies coloidais, retenção em poros finos e complexação com grupos funcionais da matéria orgânica podem limitar ou facilitar a extração dos nutrientes durante a análise (FERMINO, 2005; MEURER, 2012).

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho avaliou a eficiência de diferentes formulações de substratos alternativos, compostos por condicionadores físicos e químicos, com o objetivo de identificar opções viáveis para a produção de mudas em bandejas, considerando parâmetros físicos, químicos, morfológicos e econômicos.

Dentre os substratos analisados, destacaram-se os formulados com Poliacrilamida (PA) e Controle (base pinus), que apresentaram boa retenção de água, estabilidade dos torrões, notas elevadas na integridade estrutural e bons resultados nas avaliações morfológicas de raízes e folhas. A poliacrilamida, em especial, mostrou-se eficiente em regimes de irrigação mais intensos, promovendo desenvolvimento foliar e radicular superior. O substrato comercial, embora tenha apresentado a maior retenção hídrica imediata, não se destacou em todos os parâmetros morfológicos e possui o maior custo por quilo.

As análises de pH, condutividade elétrica e perfil nutricional evidenciaram variações importantes entre os tratamentos, influenciadas pela composição química dos condicionadores utilizados. A digestão química revelou que substratos como vermiculita e controle apresentaram melhores concentrações de macro e micronutrientes, enquanto outros, como psyllium e poliacrilamida, mostraram menores teores, mas ainda assim com bons resultados agrônômicos, indicando que a estrutura física do substrato também exerce forte influência no desempenho da muda.

A avaliação da estabilidade física dos torrões, com uma escala adaptada ao formato de bandejas, representou um avanço metodológico relevante, permitindo medir com maior sensibilidade a coesão estrutural em diferentes condições de irrigação. Já a análise de bancadas de cultivo mostrou a importância de integrar conhecimentos de física e engenharia estrutural à prática agrícola, oferecendo dados objetivos para o dimensionamento seguro e funcional de viveiros.

Para além do desempenho técnico, os substratos formulados também demonstraram vantagens econômicas importantes. A seguir, a Tabela 13 apresenta os custos totais e o custo por quilo estimado para cada substrato, considerando o volume equivalente a 90 litros de substrato:

TABELA 13 - Comparação de Custos entre Substratos Formulados e Comercial.

Componente	Custo total (R\$)	Custo por Kg (Kg/R\$)
Comercial	163,04	10,19
Base + Controle	217,15	6,26
Base + Vermiculita	216,67	6,34
Base + Bentonita	225,62	6,18
Base + Biocarvão de Bambu	232,06	6,73
Base + Psyllium	232,84	6,71
Base + Poliacrílamida	223,89	6,45

Notas: O substrato comercial é vendido em embalagens de 45 litros, com um peso total de 8 kg. Para a equivalência com as formulações, os custos foram calculados para 90 litros, correspondendo a 16 kg do substrato comercial.

FONTE: O autor (2025).

Do ponto de vista econômico, foi possível observar que os substratos formulados tiveram um custo por quilo mais baixo em relação ao comercial, que foi o mais caro (R\$ 10,19/kg). Os formulados ficaram entre R\$ 6,18 e R\$ 6,73/kg. Dentre eles, o mais barato foi o de bentonita, com R\$ 6,18/kg, seguido de perto pelo controle (R\$ 6,26/kg) e pela vermiculita (R\$ 6,34/kg). Esses números chamam a atenção porque mostram que é possível manter um bom desempenho técnico gastando menos. Como comentou Jorge et al. (2020), a escolha de um substrato precisa equilibrar qualidade agrônômica com viabilidade econômica principalmente em pequenos viveiros ou sistemas com orçamento mais limitado.

De modo geral, os substratos alternativos estudados mostraram que há como produzir mudas de qualidade com menor custo, utilizando materiais regionais e acessíveis. Essa economia não comprometeu características importantes como retenção de água, estrutura dos torrões e desenvolvimento das raízes. Além disso, integrar aspectos da engenharia, da análise econômica e da agronomia se mostrou essencial para propor soluções mais completas e realistas.

8.1.RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Investir na padronização e regulamentação dos substratos alternativos, considerando que a legislação atual ainda é bastante superficial quanto aos critérios de qualidade. A criação de normas mais específicas, tanto para a composição quanto para o desempenho dos substratos, pode favorecer sua comercialização, garantir maior segurança técnica e ampliar sua adoção por viveiristas.
- Desenvolver testes que permitam estabelecer padrões mínimos de qualidade física e química, especialmente no que diz respeito à estabilidade estrutural, retenção de água e composição nutricional dos substratos, com foco em

aplicações práticas como fertirrigação.

- Explorar a caracterização de substratos de acordo com seu uso final, estabelecendo classes e indicações conforme o tipo de recipiente (vasos, bandejas, tubetes), regime de irrigação ou finalidade produtiva. Essa abordagem pode contribuir para a recomendação de formulações específicas mais adequadas a cada contexto de produção.
- Aprofundar o estudo sobre a interação entre substrato e estrutura física, considerando o impacto da bancada, do tipo de recipiente e da frequência de irrigação no desempenho das mudas. O dimensionamento de estruturas deve levar em conta aspectos ergonômicos, de segurança e de eficiência no manejo.
- Propor padrões nutricionais de base para substratos, seja para uso direto com adubação incorporada, seja para sistemas que utilizam fertirrigação. Isso pode facilitar o manejo nutricional e aumentar a eficiência da produção em ambientes controlados.

REFERÊNCIAS

ABA – Associação Brasileira de Agroecologia. Avaliação de substratos alternativos para proAGRONOMIA COM GISMONTI. Como transformar ppm em cmolc ou mmolc/dm³. Blog, 2020.
dução de mudas. 2023.

ALMEIDA, D. S.; SOUZA, F. X.; MOURA, J. A. Avaliação de substratos orgânicos na produção de mudas de alface. Iniciação Científica - Univap, v. 13, p. 1–5, 2011.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Mapa de classificação climática de Köppen para o Brasil. Meteorologische Zeitschrift, Stuttgart, v. 6, p. 711–728, 2013. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0507.

AMAZON. Painel de Tábuas de Cortar Madeira Teca. [2025].

AMESWEB. Young's Modulus of Wood. 2023.

ARMEFER. Chapa corrugada de aço: conheça suas características, vantagens e aplicações. [2025?].

BANCADA MESA EM TELA 10 X 2. Loja Tropical Estufas. [2025].

BANDEJA PLÁSTICA 128 CÉLULAS. Bom Cultivo. [2025].

BEER, F. P.; JOHNSTON, E. R. Jr. Vector Mechanics for Engineers. New York: McGraw-Hill, 2013.

BINDER, C. R.; SOUZA, F. C.; FERREIRA, B. C. Digestão de amostras assistida por micro-ondas. In: SILVA, F. C. (org.). Manual de Métodos de Análise de Solo. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2007.

BRASIL. Manual técnico para uso do psyllium como componente de substrato agrícola. Ministério da Agricultura, 2014.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 14, de 15 de dezembro de 2004. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 17 dez. 2004.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa SDA nº 17, de 21 de maio de 2007. Diário Oficial da União, Seção I, Brasília, DF, 22 maio 2007.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa SDA nº 31, de 23 de outubro de 2008. Diário Oficial da União, Seção 1, Brasília, DF, 24 out. 2008.

BRASIL ESCOLA. Segunda Lei de Newton. [2025].

BRITO, L. M.; MOURÃO, I. Características dos substratos para horticultura: composição e constituintes individuais. Centro de Investigação de Montanha (CIMO), 2014.

CAROLINA SOIL. Substrato para plantas Carolina Soil – Classe LXXXVI, 45 litros, 8kg. Campinas: Agrosolo, 2025.

CAROLINA SOIL. Substrato para plantas Carolina Soil – Classe LXXXVI. Campinas: Plantei, 2025.

CAROLINA SOIL. Site oficial da empresa. Curitiba: Carolina Soil, 2025.

CAROLINA SOIL. Substratos Carolina Soil – Linhas e formulações. Curitiba: Carolina Soil, 2025.

CASTRO, J. M.; OLIVEIRA, R. S.; FERREIRA, D. F. Fontes e doses de adubação fosfatada em substratos para produção de mudas. Ciência Agrícola Brasileira, v. 61, p. 1–10, 2020.

CASTRO, R. D.; FERNANDES, E. T.; SOUZA, A. R. Análise física de substratos para produção de mudas florestais. Revista Cadernos de Ciência & Tecnologia, 2004.

CETEM – Centro de Tecnologia Mineral. Bentonita: uso e aplicações. Rio de Janeiro, 2012.

COSTA, E.; SOUZA, F. X.; LIMA, J. S. Substratos alternativos para produção de mudas de eucalipto. Ciência Florestal, v. 24, n. 3, p. 643–653, 2014.

EDUCAREFORMA. Densidade: definição, fórmula & cálculo, massa & volume. [2025].

EMBRAPA. Estudo do índice de área foliar de pastagens em diferentes níveis de degradação com aplicação de imagens Landsat 5 - TM e dados de campo. 2014.

EMBRAPA CAFÉ. Sistema WinRHIZO na quantificação de raízes e folhas de cultivares de cafeeiro. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 15. Brasília, DF: Embrapa Café, 2011.

EMBRAPA CERRADOS. Otimização da determinação de parâmetros radiculares de plântulas de milho. Comunicado Técnico 150. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2020.

EMBRAPA HORTALIÇAS. Produção de mudas de hortaliças. Brasília, DF: Embrapa Hortaliças, 2015.

EMBRAPA HORTALIÇAS. Produção de mudas de hortaliças. Brasília, DF: Embrapa Hortaliças, 2016. 310 p. (Boletim Técnico, 1).

ENGINEERING TOOLBOX. Concrete properties. 2008.

ENGINEERING TOOLBOX. Timber - mechanical properties. 2011.

ESALQ/USP. Morfologia foliar. Piracicaba: Universidade de São Paulo, 2023.

FABRIFER. Tabelas oxicorte. [2025].

FERMINO, M. H. Substratos: composição, características e métodos de análise. In: KÄMPF, A. N. (Org.). Substrato para plantas: a base da produção vegetal em recipientes. Porto Alegre: MEC/UFRGS, 2005. p. 13–27.

FERREIRA, B. G. A.; SOUZA, A. L.; LIMA, J. S. Desempenho de mudas de *Eucalyptus* spp. em função da composição de substratos e tipos de recipientes. *Ciência Florestal*, v. 17, n. 1, p. 83–94, 2007.

FIBROLUX. Chapas PRFV para a construção de instalações. [2025].

FÍSICA.NET. Hidrostática. [2025?].

GOMES, M. A. F.; NASCIMENTO, A. M.; LEMOS, E. E. P. Dinâmica da água em substratos hortícolas. *Agrarian Academy*, v. 5, n. 10, p. 44–57, 2018.

GONÇALVES, J. L. M.; SOUZA, F. X.; LIMA, J. S. Avaliação de substratos orgânicos na produção de mudas de hortelã para cultivo a campo. *Revista Brasileira de Plantas Medicinais*, v. 13, n. 2, p. 213-219, 2011.

HIBBELER, R. C. *Mechanics of Materials*. Boston: Pearson, 2017.

HORTICULTURA ORNAMENTAL. Características físico-químicas e análise de substrato para plantas. *Revista Brasileira de Horticultura Ornamental*, v. 28, n. 2, 2020. DOI:10.1590/2447-536X.v28i2.2496

JORGE, M. H. A.; CASTRO E MELO, R. A.; RESENDE, F. V.; COSTA, E.; SILVA, J.; GUEDES, Í. M. R. Informações técnicas sobre substratos utilizados na produção de mudas de hortaliças. Brasília, DF: Embrapa Hortaliças, 2020. 30 p. (Documentos/Embrapa Hortaliças, ISSN 1415-2312; 180).

KÄMPF, A. N. Substrato para plantas: a base da produção vegetal em recipientes. Porto Alegre: Agrolivros, 2005.

KLIECKNER METALS. A36 Steel: a deep dive into A36 plate. 2025.

KRATZ, D. Substratos renováveis na produção de mudas de *Eucalyptus benthamii*. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 23, n. 4, p. 607-621, dez. 2013.

LARCHER, W. *Fisiologia Vegetal*. 4. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2000.

LIMA, G. J. S. Análise estrutural e ergonômica de bancadas em viveiros agrícolas. TCC (Engenharia Civil) – UFCG, 2022.

LOPES, H. M.; SOUZA, F. X.; LIMA, J. S. *Técnicas de Preparo de Substrato para Aplicação em Horticultura*. Brasília: IFB, 2020.

MANUTENÇÃO DRONES AGRÍCOLAS. Superfície foliar: o que é? 2023.

MARCON, E.; SOUZA, F. X.; LIMA, J. S. Sistema WinRHIZO na quantificação de raízes e folhas de cultivares de cafeeiro. *Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento* 15, Embrapa Café, 2011.

MARTINAZZO, E. G.; SOUZA, F. X.; LIMA, J. S. Avaliação de estabilidade física de substratos em diferentes recipientes. *Revista de Ciências Agrárias*, 2021.

MAZERO, H. M. Bentonita como condicionador de substratos para a produção de mudas. 2023. 119 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Curitiba, 2023.

MENEZES JÚNIOR, J. S.; SOUZA, F. X.; LIMA, J. S. Substratos alternativos para produção de mudas: vantagens e limitações. TCC, 2023.

MESQUITA, H. C.; SOUZA, F. X.; LIMA, J. S. Substratos alternativos para a produção de mudas. IF Sertão-PE, 2023.

NASCIMENTO, E. K. A.; REGO, L. G. S.; MIRANDA, N. O.; FIGUEIRÊDO, V. B.; SILVA, N. G. Curva de retenção de água em substrato de fibra de coco para cultivos em vasos em ambiente protegido. Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável, v. 3, p. 259-265, 2021. ISSN-e 1981-8203.

NASCIMENTO, W. M.; CALORI, A. H.; CARDOSO, A. I. I.; DORIZZOTTO, C. D. A.; CANTLIFFE, D. J.; LESKOVAR, D. I.; COSTA, E.; KOCH, E. F. A.; PÉREZ-ALFOCEA, F.; LIMA, G. G. S.; MENTEN, J. O. M.; JORGE, M. H. A.; MORAES, L. A. S. de; PURQUERIO, L. F. V.; CAVALLARO JÚNIOR, M. L.; ÁZARA, N. A. de; MADEIRA, N. R.; SILVA, P. P. da; BUENO, R. C. O. F.; ANDRADE, R. J. de (em memória); SHARMA, S. P.; TIVELLI, S. W.; FATOR, T. L. Produção de mudas de hortaliças. Brasília, DF: Embrapa Hortaliças, 2016. 310 p. (Boletim Técnico, 1).

NAVROSKI, M. C. Hidrogel como condicionador de substrato para produção de mudas de *Eucalyptus dunnii* Maiden. 2013. 244 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Santa Maria, 2013.

NUNES, Maria Urbana Corrêa. Pó da Casca do Coco. Embrapa Tabuleiros Costeiros. [2025].

PETTER, F. A.; ANDRADE, F. R.; MARIMON JÚNIOR, B. H.; GONÇALVES, L. G.; SCHOSSLER, T. R. Biochar como condicionador de substrato para a produção de mudas de eucalipto. Revista Caatinga, Mossoró, v. 25, n. 4, p. 44-51, out./dez. 2012. PURDUE UNIVERSITY. Extension Publication HO-255-W. [2025].

SAMPAIO, R. A. Uso da vermiculita em substratos para mudas. Revista da UFV, 2001.

SANTOS, V. R. dos; SOUZA, F. X.; LIMA, J. S. Substratos e sua influência na qualidade de mudas. Brasília, DF: Embrapa Hortaliças, 2020. (Documentos 180).

SCARIOT, M. A.; SOUZA, F. X.; LIMA, J. S. Qualidade de substratos e desenvolvimento de mudas de tomateiro. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 17, n. 4, p. 386–391, 2013. DOI: 10.1590/S1415-43662013000400007.

SEGURA, Francisco Flores. Irrigation, Salinity and Fertility Management in Substrate Production of Berries. University of California Agriculture and Natural Resources, 2025.

SILVA, Fábio César (org.). Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 2. ed. reimpr. Brasília, DF: Embrapa, 2014. 574 p.

SILVA, F. T.; SOUZA, F. X.; LIMA, J. S. Biochar de bambu como condicionador de substrato. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 2013.

SILVA, Oclizio M. C. Influência da temperatura do substrato na produção de mudas de *Handroanthus impetiginosus* (Mart. ex DC.) Mattos. Ciência Florestal, Santa Maria, v. 30, n. 4, p. 1161-1175, out./dez. 2020.

SILVA, T. J. A.; SOUZA, F. X.; LIMA, J. S. Produção de mudas de maracujazeiro amarelo em diferentes substratos. Revista Brasileira de Fruticultura, Jaboticabal, v. 33, n. 3, p. 972-982, 2011.

SILVA, W.; SOUZA, F. X.; LIMA, J. S. WINRHIZO – Ferramenta para análise morfológica do sistema radicular e da parte aérea. IFES – Comunicado Técnico, 2022.

SONELASTIC. Propriedades de materiais poliméricos. [2025].

SUOZA, F. X. de. Materiais para formulação de substratos na produção de mudas e no cultivo de plantas envasadas. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, 2000. 21p. (Documentos, 43).

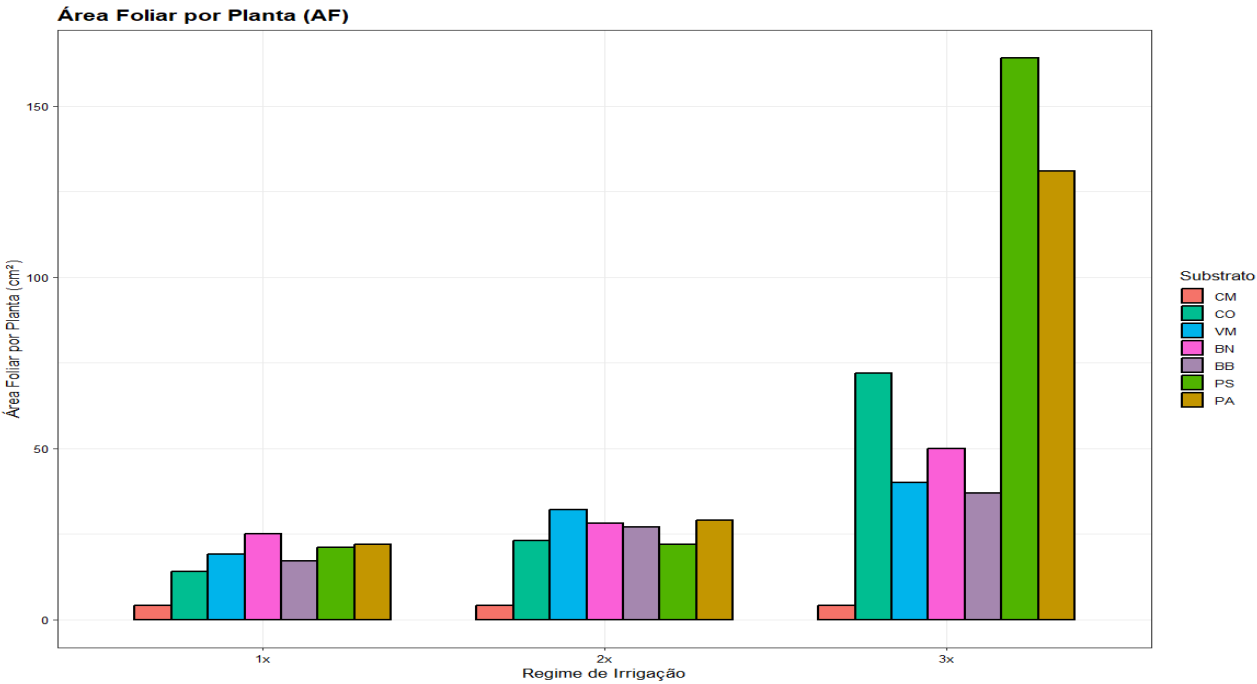
SUBSTRATO VERMICULITA 100 LITROS / 10KG. In: GREEN POWER CULTIVO. Substratos. [2025].

TODA MATÉRIA. Força Peso. [2025].

TOGOBRASIL. Chapa de fibra de vidro. [2025].

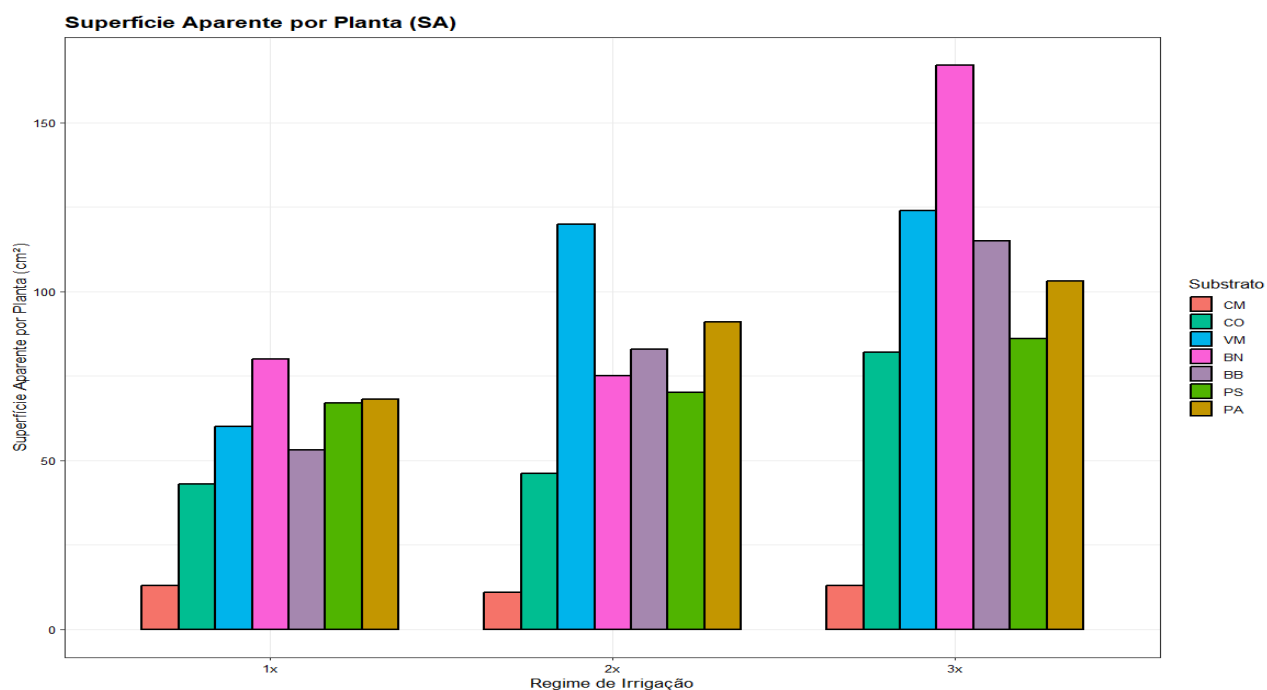
APÊNDICE 1 – GRÁFICOS WINRHIZO

GRÁFICO 10 – Área Foliar por planta (AF) e por regime de irrigação.



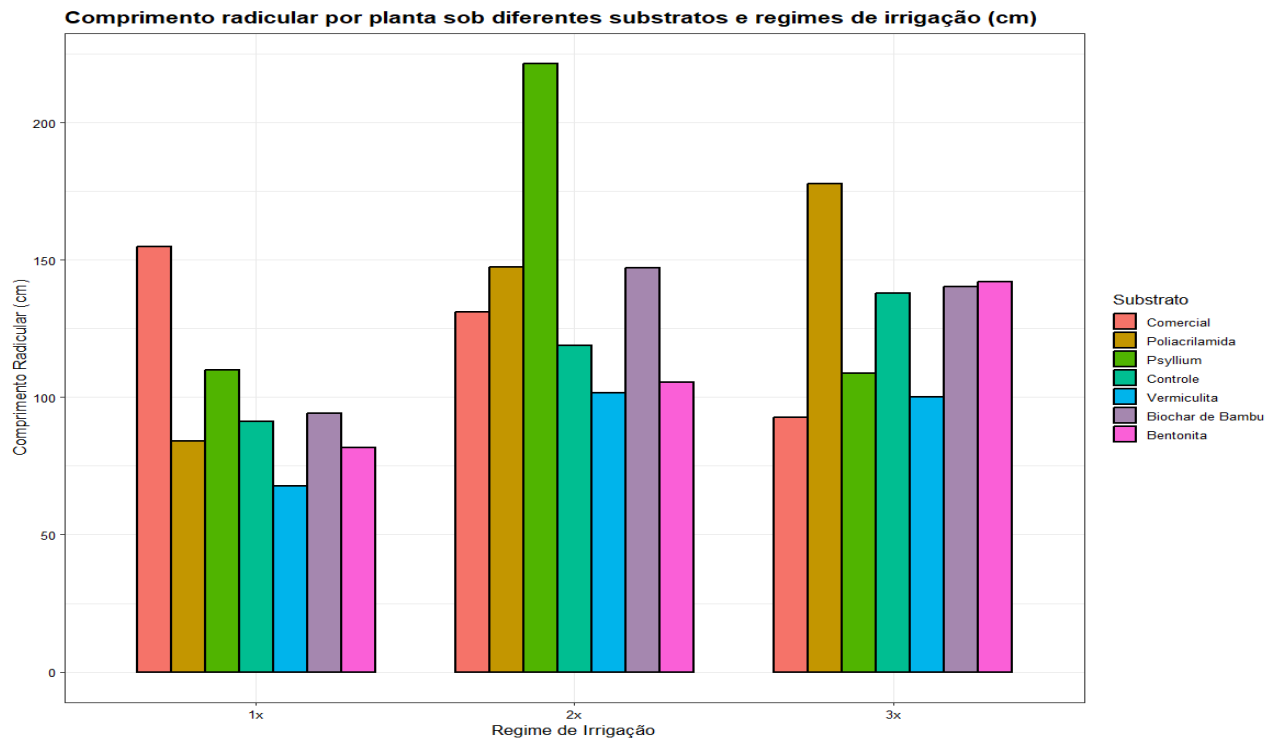
FONTE: O autor (2025).

GRÁFICO 11 – Superfície Aparente por planta (SA) e por regime de irrigação.



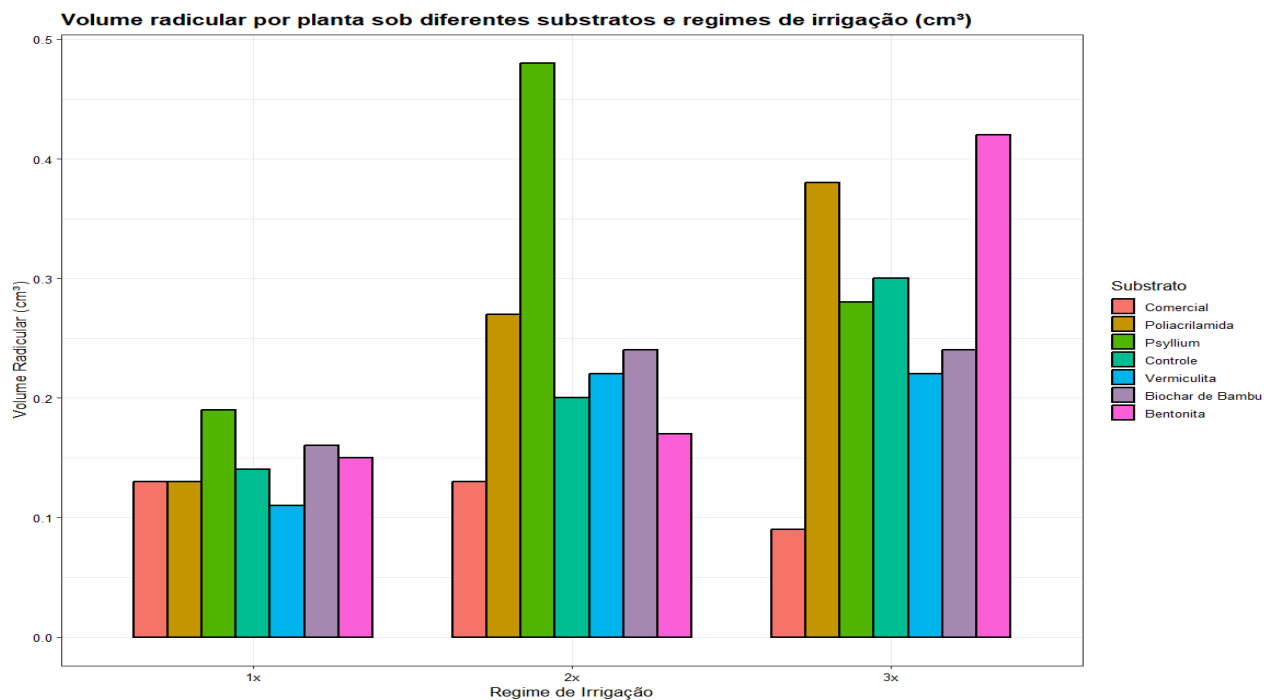
FONTE: O autor (2025).

GRÁFICO 12 – Comprimento radicular por planta sob diferentes substratos e regimes de irrigação (cm).



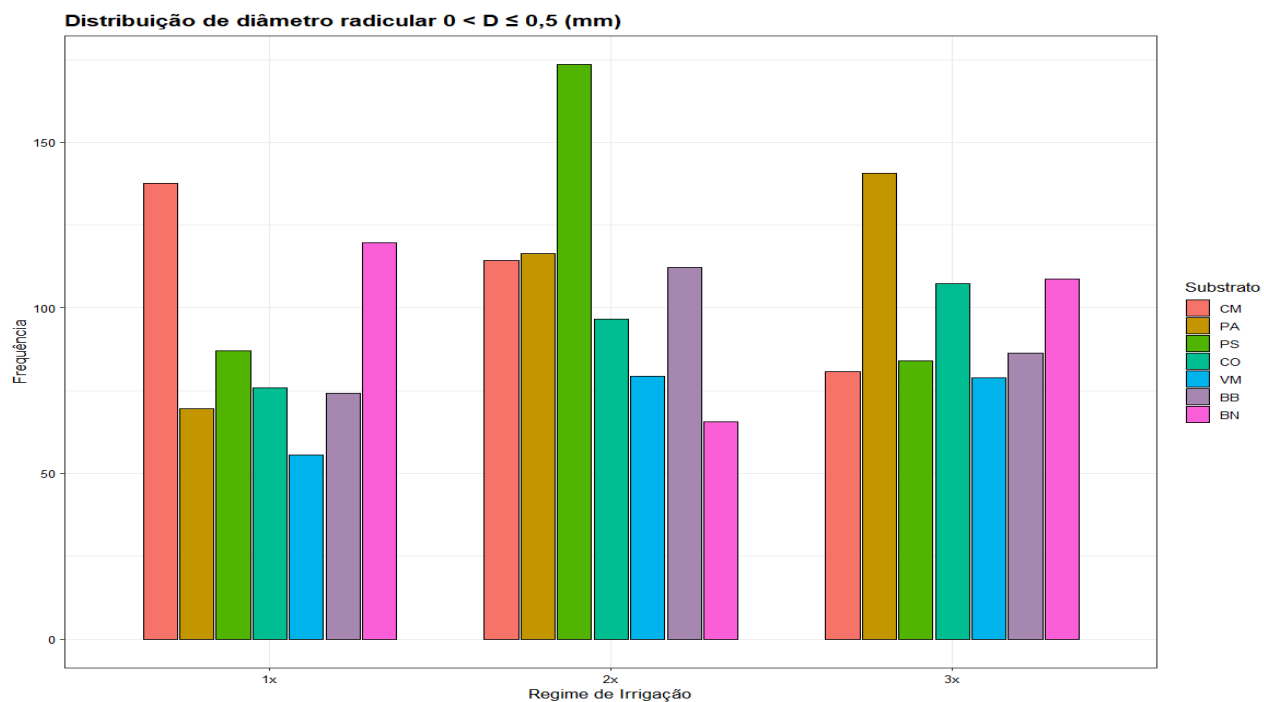
FONTE: O autor (2025).

GRÁFICO 13 – Volume radicular por planta sob diferentes substratos e regimes de irrigação (cm³).



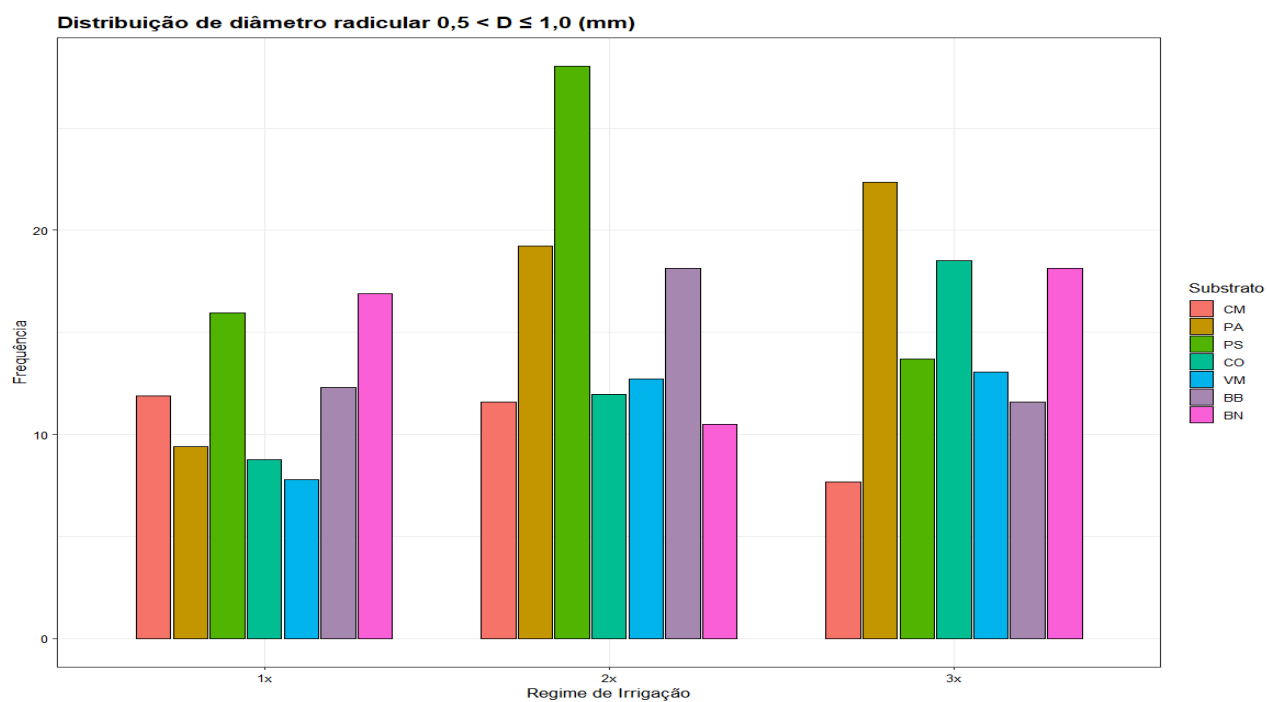
FONTE: O autor (2025).

GRÁFICO 14 – Distribuição de diâmetro radicular $0 < D \leq 0,5$ (mm).



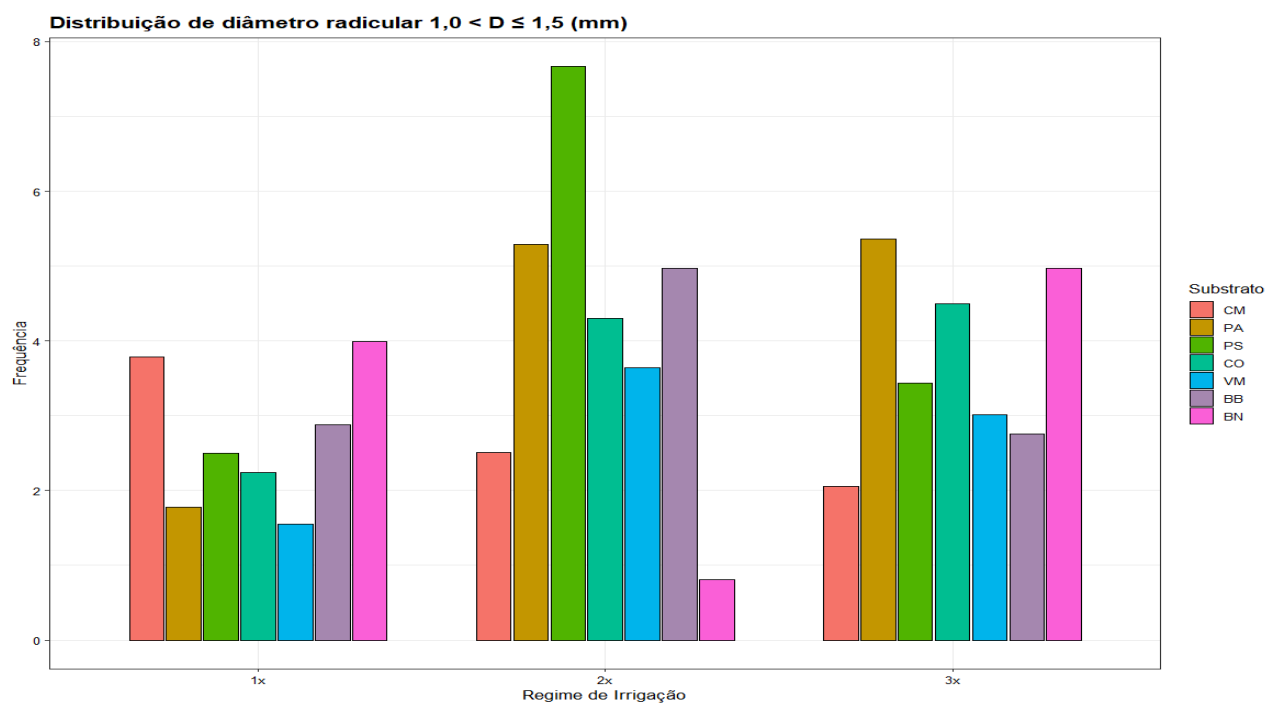
FONTE: O autor (2025).

GRÁFICO 15 – Distribuição de diâmetro radicular $0,5 < D \leq 1,0$ (mm).



FONTE: O autor (2025).

GRÁFICO 16 – Distribuição de diâmetro radicular $1,0 < D \leq 1,5$ (mm).



FONTE: O autor (2025).

ANEXO 1 – REFERÊNCIA DE INTERPRETAÇÃO DA CE

Interpretação de valores de condutividade elétrica (em dS/m a 25 graus) para vários métodos de extração (Cavins et al., 2000).

Tabela 10 - Interpretação de valores de condutividade elétrica (em dS/m a 25 °C) para vários métodos de extração (Cavins et al., 2000)				
Método de extração				Indicação
1:5	1:2	Extrato de pasta saturada	Lixiviado (pour through)	
0 a 0,11	0 a 0,25	0 a 0,75	0 a 1,0	Muito baixo - o nível de nutrientes pode não ser suficiente para sustentar um rápido crescimento.
0,12 a 0,35	0,26 a 0,75	0,76 a 2,0	1,0 a 2,5	Baixo - adequado para <i>seedlings</i> , forrações anuais e plantas sensíveis à salinidade.
0,36 a 0,65	0,76 a 1,25	2,0 a 3,5	2,6 a 4,6	Normal - faixa padrão para a maioria das plantas em crescimento (limite superior para as sensíveis à salinidade).
0,66 a 0,89	1,26 a 1,75	3,5 a 5,0	4,6 a 6,5	Alto - vigor reduzido e crescimento podem ocorrer, especialmente, durante épocas quentes.
0,9 a 1,10	1,76 a 2,25	5,0 a 6,0	6,6 a 7,8	Muito alto - pode resultar em danos devido à dificuldade de absorção de água, assim como em crescimento reduzido. Os sintomas incluem queima das bordas das folhas e murcha.
> 1,10	> 2,25	> 6,0	> 7,8	Extremo - a maioria dos cultivos sofrerá injúrias a esses níveis. A lixiviação imediata torna-se necessária.