

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel
Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da
Água



Dissertação

**Substratos formulados a base de biochar de lodo de esgoto: atributos
físico-hídricos e eficiência agronômica para mudas
de eucalipto**

Karen Raquel Pening Klitzke

Pelotas, 2024

Karen Raquel Pening Klitzke

Substratos formulados a base de biochar de lodo de esgoto: atributos físico-hídricos e eficiência agronômica para mudas de eucalipto

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água da Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências.

Orientador(a): Luís Carlos Timm

Coorientadores: Adilson Luís Bamberg

Claudia Fernanda Almeida Teixeira-
Gandra

Pelotas, 2024

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação da Publicação

K65s Klitzke, Karen Raquel Pening

Substratos formulados a base de biochar de lodo de esgoto [recurso eletrônico] : atributos físico-hídricos e eficiência agronômica para mudas de eucalipto / Karen Raquel Pening Klitzke ; Luís Carlos Timm, orientador ; Adilson Luís Bamberg, Claudia Fernanda Almeida Teixeira-Gandra, coorientadores. — Pelotas, 2024.

57 f. : il.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, 2024.

1. Lodo de esgoto aeróbio. 2. Lodo de esgoto anaeróbio. 3. Desempenho agronômico. 4. *Eucalyptus dunnii*. 5. *Eucalyptus saligna*. I. Timm, Luís Carlos, orient. II. Bamberg, Adilson Luís, coorient. III. Teixeira-Gandra, Claudia Fernanda Almeida, coorient. IV. Título.

CDD 631.6

**Dedico este trabalho aos meus pais e a
minha irmã.**

Agradecimentos

Primeiramente a Deus, por ter me dado saúde e motivação para vencer os desafios enfrentados durante esta etapa tão importante.

Aos meus pais Gerson e Ilanda Maria, a minha irmã Klarisse e ao meu namorado Diego, pelo apoio, carinho e valiosa colaboração em todos os momentos.

A Universidade Federal de Pelotas, ao Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água e a seu corpo docente, pela oportunidade de realizar o mestrado.

Ao meu orientador, prof. Dr. Luís Carlos Timm, por ter me acolhido como orientanda no mestrado, além de ter compartilhado a sua experiência e conhecimento, e disposição em me ajudar na realização deste trabalho.

Ao pesquisador Dr. Adilson Luís Bamberg pela coorientação, por compartilhar seu conhecimento, paciência e por sempre estar disponível para esclarecer minhas dúvidas, pelo seu comprometimento e incentivo, os quais me ajudaram a superar desafios e proporcionar meu crescimento profissional e pessoal ao longo desta caminhada, contribuindo significativamente para minha formação.

A prof. Dr^a Claudia Fernanda Almeida Teixeira-Gandra pelas contribuições e disposição em me ajudar na realização deste trabalho.

A Luciana Alves, analista da Embrapa, pelo valioso auxílio nas análises do experimento, bem como pelos momentos de conversa e descontração compartilhados ao longo deste processo.

Demais funcionários da Embrapa Clima Temperado que colaboraram de forma direta ou indiretamente para que este trabalho pudesse ser realizado.

A Embrapa Clima Temperado pela infraestrutura para realização deste trabalho (sala de estudos, casa de vegetação e laboratórios). Também pela disponibilidade de carros, motoristas, e materiais de segurança no trabalho.

A Capes pela bolsa concedida.

A todos aqueles que me ajudaram, de forma direta ou indireta, deixo aqui registrado o meu MUITO OBRIGADA!

Resumo

KLITZKE, Karen Raquel Pening. **Substratos formulados a base de biochar de lodo de esgoto: atributos físico-hídricos e eficiência agrônômica para mudas de eucalipto**. Orientador: Luís Carlos Timm. 2024. 57 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2024.

Com o crescimento da população mundial e aumento da urbanização e desenvolvimento econômico, ocorrerá um aumento na geração de resíduos sólidos e por consequência, maiores quantidades de lodos de estações de tratamento de esgoto sanitário (LETES) serão gerados. Atualmente, estudos direcionados a utilização de biochar de LETE como componente de substratos para o desenvolvimento de mudas vêm sendo realizadas, porém há grande carência de informações sobre o seu uso na produção de mudas de diferentes culturas, como por exemplo, o eucalipto. Nesse sentido, o presente trabalho tem por objetivo avaliar a eficiência do biochar de LETE como substrato na produção de mudas de eucalipto. O estudo foi realizado com LETES aeróbios e anaeróbios oriundos das ETES de Rio Grande/RS e Passo Fundo/RS, respectivamente. Os substratos foram formulados a partir de biochar de LETES aeróbio e anaeróbio acrescido de uma Mistura “base” (vermiculita, casca de arroz carbonizada e composto orgânico). Na sequência, realizou-se a caracterização química e físico-hídrica dos substratos e a avaliação da performance agrônômica do mesmo para as espécies de eucalipto: *Eucalyptus dunnii* e *Eucalyptus saligna*. Observou-se que o biochar proporcionou um aumento na densidade úmida e seca e uma diminuição na porosidade total. Quanto à caracterização química, o biochar de LETE influencia na disponibilidade dos macronutrientes e micronutrientes, alguns de forma mais expressiva do que outros. As formulações que continham 50% ou mais de biochar de LETE foram aquelas que apresentaram um Índice de Qualidade de Dickson equivalentes ou superiores aos substratos comerciais. Os resultados desse estudo reforçam a viabilidade da utilização de substratos à base de biochar de LETE anaeróbio e aeróbio como base eficiente e segura para o desenvolvimento de meios de cultivo para plantas.

Palavras-chave: Lodo de esgoto aeróbio; lodo de esgoto anaeróbio; desempenho agrônômico; *Eucalyptus dunnii*, *Eucalyptus saligna*.

Abstract

With the growth of the world population and increasing urbanization and economic development, there will be an increase in the generation of solid waste and consequently, larger quantities of sludge from sanitary sewage treatment plants (LETES) will be generated. Currently, studies focused on the use of LETE biochar as a component of substrates for seedling development have been conducted, but there is a great lack of information about its use in the production of seedlings from different crops, such as eucalyptus, for example. In this sense, the present study aims to evaluate the efficiency of LETE biochar as a substrate in the production of eucalyptus seedlings. The study was conducted with aerobic and anaerobic LETES from the sewage treatment plants of Rio Grande/RS and Passo Fundo/RS, respectively. The substrates were formulated from aerobic and anaerobic LETE biochar added to a "base" mixture (vermiculite, carbonized rice husk, and organic compost). Chemical and physico-hydraulic characterization of the substrates was then performed, along with the agronomic performance evaluation for eucalyptus cultivation. It was observed that biochar resulted in an increase in both wet and dry density and a decrease in total porosity. Regarding chemical characterization, LETE biochar influences the availability of macronutrients and micronutrients, some more significantly than others. Formulations containing 50% or more LETE biochar were those that showed Dickson Quality Index equivalent to or higher than commercial substrates. The results of this study reinforce the viability of using anaerobic and aerobic LETE biochar-based substrates as an efficient and safe foundation for developing plant growth media.

Keywords: Aerobic sewage sludge; anaerobic sewage sludge; agronomic performance; *Eucalyptus dunnii*, *Eucalyptus saligna*.

Sumário

1 Introdução	10
2 Revisão de literatura	12
2.1 Geração de lodos de estações de tratamento de esgoto	12
2.2 Biochar de lodo de esgoto	15
2.3 Substrato para plantas	16
2.4 O cultivo de eucalipto	18
2.5 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU	20
3 Hipótese	21
4 Objetivos	21
4.1. Geral	21
4.2. Específicos	22
5 Capítulo 1: Atributos físico-hídricos e químicos de substratos à base de biochar de lodo de estação de tratamento de esgoto (LETE) aeróbio e anaeróbio na produção de mudas de eucalipto	23
5.1 Introdução.....	23
5.2 Materiais e Métodos	24
5.2.1 Obtenção do biochar	24
5.2.2 Formulação dos substratos (tratamentos)	25
5.2.3 Caracterização química e físico-hídrica dos substratos	27
5.6 Análise estatística	28
5.7 Resultados e Discussão.....	28
5.7.1 Caracterização físico-hídrica das formulações.....	28
5.7.2 Caracterização química das formulações.....	32
5.7.3 Conclusões	40

6 Capítulo 2: Desempenho agrônômico de mudas de eucalipto cultivadas em substratos à base de biochar de lodo de estação de tratamento de esgoto (LETE) aeróbio e anaeróbio	42
6.1 Introdução.....	42
6.2 Materiais e Métodos	43
6.2.1 Matérias primas e formulações experimentais dos substratos	43
6.2.2 Experimentos de avaliação da performance agrônômica	44
6.2.3 Análise estatística	46
6.3 Resultados e Discussão.....	46
6.5 Conclusões.....	51
Considerações Finais	52
Referências.....	53

1 Introdução

De acordo com a 27^a edição do relatório Perspectivas da População Mundial de 2022 da ONU, a população mundial em 2050 chegará a 9,7 bilhões e a 10,4 bilhões até o ano 2100 (ONU, 2022), acarretando um aumento substancial na geração de resíduos sólidos. O destino sustentável, seguro e eficiente dos lodos de estações de tratamento de esgoto (LETES) vem se tornando uma pauta muito importante, o que carece de estudos para encontrar soluções nesse sentido.

Atualmente, existem diversas alternativas para a disposição final do lodo de esgoto, desde a disposição direta no solo em aterros sanitários até a sua incineração. Entretanto, estas destinações não se apresentam como as mais adequadas do ponto de vista ambiental. Surge assim a possibilidade de ser utilizado para fins agrícolas e florestais, pois os lodos de esgoto são ricos em matéria orgânica e em macro e micronutrientes para as plantas, podendo ser utilizados como matéria prima para condicionadores de solo e fertilizantes. Porém, esse uso está limitado à sua composição, que pode apresentar diversos poluentes, como por exemplo, compostos orgânicos persistentes, contaminantes emergentes e organismos patogênicos.

A utilização de fertilizantes derivados da compostagem de resíduos de estações de tratamento de esgoto é também uma forma de proporcionar ou auxiliar o fornecimento adequado de nutrientes em plantios, além de ser uma alternativa para reutilização de resíduos que seriam descartados de forma inadequada, podendo ainda trazer a diminuição de custos de produção e proporcionar ganhos em qualidade e produtividade.

Apesar dos grandes benefícios que o uso de LETES na agricultura e na formulação de substratos resulta, este ainda não está bem difundido devido à possibilidade de haver contaminantes, principalmente de microrganismos patogênicos, em níveis acima daqueles aceitos pela legislação (CONAMA 498/2020) (Nascimento *et al.*, 2014).

Atualmente, dentre alguns dos processos aceitos para redução significativa de patógenos pela legislação (CONAMA 498/2020), pode-se citar a digestão aeróbia, a digestão anaeróbia, a compostagem, secagem em leitos de areia ou em bacias, estabilização com cal, dentre outros. A legislação ainda destaca que outros processos poderão ser propostos, desde que haja comprovação de sua eficiência. Assim, a pirólise tem se tornado também uma alternativa para o tratamento do LETE, tanto pela

eliminação dos microrganismos patogênicos, quanto pelo possível aumento do potencial agrônômico do produto gerado (Ren *et al.*, 2018; Yue *et al.*, 2017).

Alguns países vêm utilizando o LETE para queima, visto que é um produto com potencial energético (Frišták *et al.*, 2017; Ren *et al.*, 2018; Yue *et al.*, 2017). No Brasil, seu uso apresenta-se como promissor para a obtenção do biochar de LETE, um produto sólido resultante da sua pirólise, que pode ser utilizado como condicionador de solo, fertilizante e componente de substrato para plantas.

Durante a produção de mudas, o uso de substratos adequados está diretamente ligado à qualidade na formação e desenvolvimento da planta, pois tem influência nas condições ideais de germinação, crescimento e desenvolvimento de cada espécie até o momento do transplante. Um bom substrato deve apresentar aeração, drenagem, retenção de água e disponibilidade de nutrientes adequados, além da disponibilidade no mercado e baixo custo de aquisição.

Estudos direcionados a utilização de biochar de LETE como substratos para o desenvolvimento de mudas vêm sendo efetuados nos últimos anos, apontando um desempenho positivo sob determinadas condições. Este desempenho está relacionado aos atributos físico-hídricos que satisfazem as necessidades nutricionais e ambiente propício ao sistema radicular da planta (Monteiro *et al.*, 2022; Monteiro *et al.*, 2021; Monteiro *et al.*, 2017)

A utilização de biochar para compor substratos para a produção de mudas de eucalipto se apresenta como uma alternativa potencialmente viável e sustentável. Entretanto, ainda existe carência de informações sobre o uso do biochar de LETE como substrato para produção de mudas de diferentes culturas, como por exemplo, o eucalipto.

Nesse contexto, fica explícito a necessidade de estudos voltados à utilização do biochar de LETE na produção de mudas de espécies de eucalipto e o desenvolvimento de dados de referência para esta cultura.

2 Revisão de literatura

2.1 Geração de lodos de estações de tratamento de esgoto

Ao longo dos últimos anos, principalmente após a revolução industrial a população mundial teve crescimento expressivo. Em 2022, a população brasileira ultrapassou os 203 milhões de habitantes, representando um aumento de 6,5% em comparação com o ano de 2010 (IBGE, 2022). Esse aumento populacional somado à urbanização, ao desenvolvimento econômico e à instalação ampla de sistemas de coleta e tratamento de esgotos domiciliares proporcionou um aumento na geração de resíduos sólidos nas estações de tratamento de esgoto sanitário.

Em 1989, cerca de 47,35% dos municípios brasileiros possuíam serviço de coleta do esgotamento sanitário, já em 2017 esse percentual passou para 60,3%, deste percentual cerca de 51% recebiam o tratamento adequado, enquanto que o restante era descartado sem tratamento, ou tratado em sistemas individuais inadequados (IBGE, 2020), ou insuficientes para o atendimento dos padrões vigentes de emissão de esgoto tratado. No ano de 2017, o Brasil foi responsável por gerar em torno de 21,27 milhões de m³ diários de esgoto, do qual somente 51,6% foram tratados (Tabela 1).

Tabela 1: Volumes diários de esgoto gerado, coletado e tratado, com indicação de seus percentuais, segundo as Grandes Regiões – 2017

Grandes Regiões	Volumes diários de esgoto (milhões m ³)			Percentual de esgoto (%)		
	Gerado	Coletado	Tratado	Gerado e coletado	Coletado e tratado	Gerado e tratado
Brasil	21,27	14,26	10,98	67,0	77,1	51,6
Norte	0,99	0,19	0,16	19,0	86,7	16,4
Nordeste	3,86	1,60	1,50	41,4	94,0	38,9
Sudeste	11,45	9,58	6,65	83,6	69,4	58,1
Sul	3,25	1,80	1,62	55,3	90,3	50,0
Centro-Oeste	1,72	1,09	1,05	63,5	95,9	60,9

Fonte: IBGE, 2020.

Com o crescimento da população e o conseqüente aumento da geração de efluentes, a solução para disposição destes é o tratamento do esgoto, visto que esses dejetos são considerados como uma fonte de risco à saúde pública e ao meio ambiente, além de potencializarem a proliferação de vetores de moléstias e organismos nocivos (BRASIL, 2006).

Ao longo do processo de tratamento do esgoto são obtidos também outros resíduos, como por exemplo, areia, espuma e lodo. No Brasil, em 2017, foram gerados aproximadamente 2.457.515,6 toneladas de lodo de esgoto, tendo a região sudeste como a maior produtora, seguida da região Nordeste e Sul (Brasil, 2022).

O lodo é um resíduo que pode se apresentar na forma sólida, semi-sólida ou líquida, dependendo do nível e das tecnologias de desaguamento empregadas na estação de tratamento. Do ponto de vista agrônômico, é rico em matéria orgânica e em nutrientes, destacando-se ainda pelos seus grandes volumes gerados, mas que possui diversos potenciais de poluição, certa complexidade de seu tratamento e custos significativos de manejo e destinação (Batista, 2015; Jordão; Pessoa, 2005).

O termo "lodo" tem sido utilizado para designar os subprodutos sólidos do tratamento de esgotos, já o termo biossólido era inicialmente utilizado quando se desejava ressaltar os aspectos benéficos e valorização produtiva desse subproduto (Andreoli; Sperling; Fernandes, 2001). Atualmente, biossólido se refere aos lotes de lodo de esgoto que atendem aos requisitos da legislação vigente através da Resolução Conama Nº 498/2020, que regulamenta a sua disposição direta em solos.

De acordo com Andreoli *et al.*, (2001), a fração sólida e seca do lodo apresenta em média 1 a 2% do volume de esgoto tratado, entretanto, os custos de seu processamento e disposição final podem representar até 60% dos custos de operação e 90% dos problemas operacionais de uma ETE.

Dentre as alternativas mais comuns de disposição final dos lodos de ETEs pode-se citar a disposição em aterros sanitários, *landfarming*, incineração e uso agrícola (Batista, 2015).

Em aterros sanitários, o lodo é disposto em células previamente impermeabilizadas, após é coberto por uma camada de terra, onde sua degradação ocorre através de atividade anaeróbia, lenta e com produção de metano (Paula; Soares; Siqueira, 2006; Batista, 2015). Já o "*landfarming*" consiste na aplicação do resíduo na superfície do solo, onde através da biorremediação microbiana ocorre a redução das concentrações dos resíduos orgânicos sólidos em um perfil arável do solo (até 20 cm). Esta alternativa foi desenvolvida no âmbito da indústria petrolífera, mas também apresenta bons resultados com outros resíduos orgânicos, inclusive com elevadas doses de lodo de esgotos (Batista, 2015).

A incineração é um processo térmico de oxidação onde o lodo é convertido em gases e em resíduos sólidos, com a vantagem de produzir cinzas ou pó que

corresponde a cerca de 10 a 25% da massa inicial de lodo. Em contrapartida, o método libera gases tóxicos, que podem ser filtrados ou emitidos à atmosfera, sendo resultantes, tanto da sua queima quanto da queima do combustível responsável pela combustão (Batista, 2015; Vesilind; Hwang; Ouchi; Matsuto, 2007; Ramsey, 1996).

Já o uso do lodo para fins agrícolas e florestais é uma das alternativas mais atrativas, visto que esse material é rico em matéria orgânica e em macro e micronutrientes para as plantas. Porém, essa destinação deve ser feita de modo seguro. Devido à possibilidade de conter metais pesados, compostos orgânicos persistentes, contaminantes emergentes e organismos patogênicos em níveis acima daqueles permitidos pela legislação correspondente (Bettiol; De Camargo, 2006), é fundamental caracterizar os lotes de LETEs, antes e após seu tratamento, e definir doses corretas do ponto de vista agrônômico e ambiental para o uso agrícola com segurança.

Quando utilizado para fins agrícolas, o lodo de esgoto deve passar por processos de tratamento que reduzem o teor de material orgânico biodegradável, a concentração de organismos patogênicos e o teor de água, para a obtenção de um material sólido e estável, que não constitua perigo para a saúde e possa ser manipulado e transportado com facilidade e a baixo custo (Brasil, 2020).

Além disso, após sua caracterização, para que estejam aptos à disposição direta em solos agrícolas, os lotes de lodos de esgoto devem atender a uma série de requisitos, sendo classificados como biossólidos de Classe A ou B, ou seja, deverão atender ao limite máximo de 10^3 e 10^6 unidades formadoras de colônias (UFC) de *Escherichia coli* por grama de sólidos totais (g^1 de ST) ou ser proveniente de um dos processos de redução de patógenos descritos na Resolução Conama 498/2020 (Brasil, 2020), respectivamente. Também deverão atender aos valores máximos permitidos de substâncias químicas, conforme a Tabela 2.

Tabela 2: Valores máximos permitidos de substâncias químicas permitidas no biossólido a ser destinado diretamente em solos

Substâncias Químicas	Valor máximo permitido no biossólido ($mg\ kg^{-1}ST$)	
	Classe A	Classe B
Arsênio	41	75
Bário	1300	1300
Cádmio	39	85
Chumbo	300	840

Cobre	1.500	4.300
Cromo	1.000	3.000
Mercúrio	17	57
Molibdênio	50	75
Níquel	420	420
Selênio	36	100
Zinco	2.800	7.500

Fonte: Adaptado da Resolução Conama nº 498/2020 (Brasil, 2020).

2.2 Biochar de lodo de esgoto

O biochar é reconhecido como um produto obtido a partir da combustão incompleta de biomassas orgânicas (folhas, madeiras, esterco, entre outros) a temperaturas entre 300 – 1.000 °C, em ambientes com ausência ou baixas concentrações de oxigênio (O₂), tendo como característica principal o fato de ser um produto rico em carbono estável na sua composição (Lehmann; Joseph, 2015). Esse processo de combustão e obtenção do biochar é conhecido como pirólise (Lehmann; Joseph, 2015; Rizwan *et al.*, 2016; Yuan *et al.*, 2016). A pirólise vem sendo reconhecida entre os métodos mais promissores para o tratamento de LETEs, podendo ser utilizada para reduzir seu volume e garantir a sua desinfecção completa (Agrafioti *et al.*, 2013).

Quando o biochar é adicionado no solo ou misturado junto a outras matérias primas para compor substratos, este influencia na porosidade e na capacidade de armazenamento de água, devido ao aumento da sua área superficial específica proporcionado pela pirólise (Silva *et al.*, 2017). A pirólise de LETEs ainda não é amplamente utilizada no Brasil, entretanto, nos últimos anos os pesquisadores vêm desenvolvendo pesquisas para avaliar o potencial do biochar de LETE como matéria-prima para substratos para o crescimento de plantas (Araujo, 2016; Monteiro, 2019; Souza, 2015).

O LETE caracteriza-se por apresentar boa fertilidade, porém necessita da mistura de outros componentes para equilibrar nutrientes e as características físicas, tornando-se assim um substrato adequado para o cultivo de mudas (Faria *et al.*, 2013). Caldeira *et al.* (2012) ressaltam que a utilização do LETE como substrato para o cultivo de mudas é uma alternativa economicamente viável devido a sua fácil obtenção e alta quantidade produzida, além de ser um destino mais adequado dos lodos.

A partir das ETEs pode-se obter basicamente dois tipos de lodos, o anaeróbio e o aeróbio, a depender da rota de decomposição microbiológica adotada. O lodo

anaeróbio é oriundo de ETEs anaeróbias, ou seja, onde o processo de digestão e estabilização da matéria orgânica ocorre no ambiente livre de oxigênio molecular. Já o lodo aeróbio é proveniente de ETE aeróbia, onde durante a digestão ocorre a aeração forçada para suprir ou injetar o oxigênio que será utilizado pelos microrganismos para a digestão do material orgânico adicionado, continuamente ou por batelada, no processo (Andreoli; Sperling; Fernandes, 2001).

Os lodos obtidos a partir de ETEs aeróbias apresentam um teor menor de matéria orgânica e maiores teores de sólidos inorgânicos quando comparado com o lodo anaeróbio, os quais podem resultar em distintos tipos de biochar e, conseqüentemente, afetar a composição final do substrato. Desta forma, é fundamental tratar de forma distinta os LETEs conforme o processo (aeróbio ou anaeróbio) que os originou.

Nos últimos anos, vem se desenvolvendo estudos sobre a utilização de lodo de esgoto na agricultura como uma alternativa sustentável para as culturas sob o ponto de vista social, econômico e ambiental, devido a sua capacidade nutricional e a disponibilidade do resíduo (Caldeira, 2013; Carvalho, 2018; Kratz; Wendling, 2013; Nascimento, 2014; Silva, 2017; Silva, 2018). Mais recentemente, estudos científicos vêm demonstrando o potencial de uso do biochar na composição de substratos, seja para o cultivo de alface e acácia (Monteiro, 2019), de *Salvia splendens* e *Pachyveria glauca* (Rodrigues, 2017) e *Corymbia citriodora* (Matos, 2020).

2.3 Substrato para plantas

O termo “substrato para plantas” é utilizado para descrever o meio de crescimento usado no cultivo de plantas em recipientes, proporcionando estabilidade e níveis suficientes de água e oxigênio para um ótimo desenvolvimento das plantas (Fermino; Kämpf, 2012; Vence, 2008).

Para a obtenção de uma boa formação e produção de mudas, o substrato deve apresentar algumas características, como por exemplo, disponibilidade e fornecimento continuado ao mercado, teor significativo e balanceado de nutrientes, baixo custo, pH e capacidade de troca de cátions adequados, ausência de patógenos, aeração, retenção de água e boa agregação às raízes (Jorge *et al.*, 2020).

Além de proporcionar qualidade, rendimento e praticidade na produção das mudas, após o transplante das mudas para o local definitivo, o substrato deve

proporcionar plantas vigorosas e resistentes a estresses diversos, tornando-as mais produtivas e, muitas vezes resultando em menor tempo para iniciar a produção (Jorge *et al.*, 2020).

Um dos desafios para a obtenção de um substrato de boa qualidade está relacionado à sua formulação, a qual é diretamente influenciada pelos produtos que são utilizados em sua mistura. Dessa forma, é importante conhecer e padronizar as propriedades físicas e químicas de cada mistura, a fim de obter um substrato com condições satisfatórias (Fermino; Kämpf, 2012; Monteiro, 2019).

As propriedades químicas são de suma importância para o desenvolvimento vegetal. Porém, as propriedades físicas também se destacam durante a formulação de um substrato, pois após o substrato estar formulado e inserido em um recipiente não será mais possível modificar as suas relações ar-água e demais atributos, podendo assim delimitar o crescimento do sistema radicular da cultura (Diaz, 2010). Conforme Gonçalves *et al.* (2000), um substrato ideal deve apresentar uma boa estrutura e consistência, boa porosidade, boa capacidade de retenção de água, ausência de substâncias tóxicas, de agentes patogênicos e de sementes invasoras e apresentar pequenas variações entre lotes.

Dentre as matérias primas utilizadas tradicionalmente como componentes para substratos, ocupa papel de destaque a turfa, que consiste em uma substância fóssil de composição organo-mineral e coloração variável entre o cinza e o preto (devido à presença de ulmina), encontrada em alagadiços (Pinto, 2003). Entretanto, a extração da turfa contribui significativamente para a degradação dos ecossistemas naturais, resultando na remoção da cobertura vegetal natural, alterando irreversivelmente o uso do solo do local da extração, e acelerando a destruição de habitats essenciais para a biodiversidade. Além disso, é importante ressaltar que a formação da turfa é um processo extremamente lento que ocorre ao longo de milhares de anos, enquanto sua extração é realizada em uma escala de tempo consideravelmente mais rápida, o que intensifica o desequilíbrio entre a taxa de formação e a degradação acelerada desse recurso natural.

Nesse sentido, destacam-se pesquisas que proporcionem uma avaliação dos efeitos de biochar de LETEs anaeróbios e aeróbios como componentes alternativos à turfa, em formulações de substratos para a produção de mudas.

2.4 O cultivo de eucalipto

O gênero *Eucalyptus* tem seu centro de origem na Austrália, Tasmânia e outras ilhas da Oceania. Atualmente, existe um amplo conjunto de espécies de eucalipto que têm sido utilizadas em todo o território brasileiro devido ao seu rápido crescimento, capacidade de adaptação às diversas regiões ecológicas e pelo potencial econômico (Nascimento, 2022).

O setor de árvores cultivadas no Brasil, além de ser responsável por gerar empregos e renda, também auxilia no desenvolvimento social e ambiental. No ano de 2022, este setor contribuiu com cerca de 1,3% na formação do PIB brasileiro, ressaltando assim a importância dessa atividade (IBÁ, 2023).

Conforme o relatório anual do IBÁ (2023) a área de árvores plantadas em 2022 alcançou cerca de 9,94 milhões de hectares, com um aumento de 0,3% em relação ao ano de 2021 (aproximadamente 9,8 milhões de hectares). Em 2022, aproximadamente 76% (7,6 milhões de hectares) das áreas plantadas eram cultivadas com eucalipto, 19% (com 1,9 milhão de hectares) com pinus e 5% (0,44 milhão de hectares) com outras espécies, como por exemplo, a seringueira, acácia, teca e paricá, o que demonstra a relevância das espécies de eucalipto para este setor no Brasil.

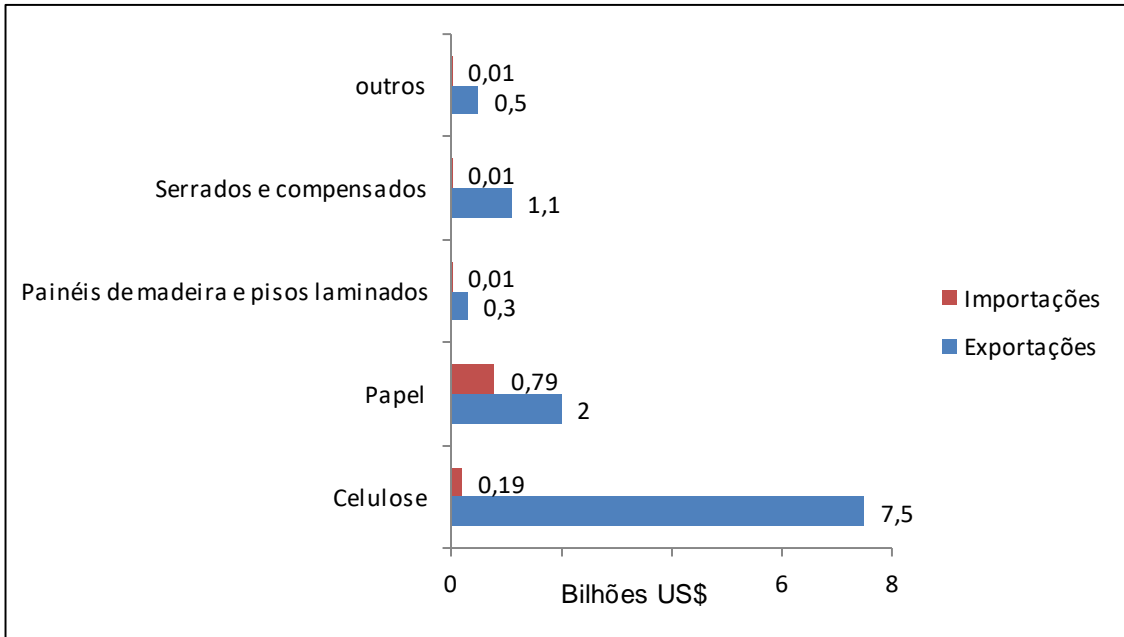
Conforme dados da Indústria Brasileira de Árvores (2023), o Brasil registrou uma produção de 25 milhões de toneladas de celulose em 2022, representando um crescimento de 10,9% em comparação com o ano anterior e deste total cerca de 23,2% foram destinados ao mercado interno e o restante ao mercado externo. No mesmo período, a produção brasileira de papel (embalagens, impressão e escrita, papel sanitário, papel-cartão e outros tipos de papéis) totalizou aproximadamente 11 milhões de toneladas, onde o mercado interno absorveu a maior parte desse volume, correspondendo a cerca de 77,2% do consumo.

Quanto à produção de madeira serrada, o país alcançou aproximadamente 8 milhões de metros cúbicos em 2022, dos quais cerca de 61% foram direcionados ao mercado interno. No segmento de pisos laminados, aproximadamente 95% da produção é destinada ao mercado doméstico, enquanto que, para os painéis de madeira, 82% têm como destino a exportação (IBÁ, 2023).

No Brasil, o cultivo de eucalipto é destinado principalmente à produção de madeira que é utilizada na fabricação de celulose, papel, painéis de madeira, piso

laminados, carvão vegetal, produtos sólidos de madeira entre outros produtos, conforme a Figura 1, que demonstra a relação entre os produtos derivados do eucalipto e a sua importância relativa na economia brasileira.

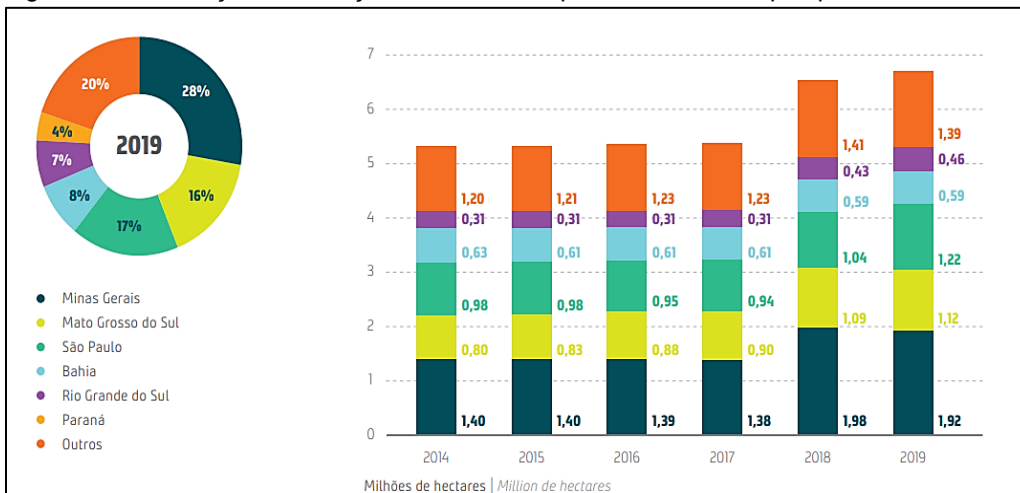
Figura 1: Balança comercial da cadeia produtiva dos produtos derivados da produção e processamento do eucalipto por produto em 2019



Fonte: Adaptado IBÁ, 2020.

Os Estados brasileiros com maior área plantada de eucalipto são Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, São Paulo, Bahia, Rio Grande do Sul e Paraná, tendo o estado de MG a maior área de plantio e o RS ocupando a quinta colocação nesse ranking, conforme a Figura 2.

Figura 2: Distribuição e evolução da área com plantios de eucalipto por estado



Fonte: IBÁ, 2020.

Estima-se que a produtividade média de eucalipto seja aproximadamente de $39 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$, a qual depende de diversos fatores, como o local de plantio, os tratos culturais e os insumos disponibilizados (Embrapa, 2019).

A produção de mudas de eucalipto em ambientes protegidos permite que as mesmas apresentem melhor qualidade no momento do transplante, desde que manejadas adequadamente. Dentre os fatores que influenciam o desenvolvimento das mudas, têm-se o ambiente de cultivo, o sombreamento, a ventilação, os recipientes de cultivo e a qualidade do substrato. O substrato se destaca como fator de grande importância, visto que é responsável por reter a umidade e fornecer os nutrientes necessários ao desenvolvimento das plantas (Cunha *et al.*, 2006; Reisser Junior *et al.*, 2008).

Dessa forma, estudos referentes à qualidade do substrato visando maior eficiência produtiva da cultura do eucalipto têm sido intensificados com o intuito de buscar uma melhoria na qualidade das mudas e, assim, promover o sucesso de seu transplante para o campo. Adicionalmente, espera-se que substratos com atributos físico-hídricos adequados e agronomicamente eficientes, desenvolvidos a partir de biochar de LETE favoreçam não somente a população urbana e as empresas de saneamento, mas também toda a cadeia produtiva do eucalipto, tais como produtores rurais, indústrias ligadas ao setor e até mesmo a balança comercial brasileira.

2.5 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU

Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) consistem numa série de metas globais estabelecidas pela Assembleia Geral das Nações Unidas (ONU) em 2015, para acabar com a pobreza, proteger o meio ambiente e o clima. Ao total são 17 objetivos destinados a guiar esforços de desenvolvimento em todo o mundo até 2030, com o objetivo de alcançar um futuro mais sustentável e equitativo para todos (ONU, 2024).

O desenvolvimento de substratos a partir de biochar de lodo de esgoto desempenha um papel significativo na promoção dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). O lodo de esgoto representa um desafio ambiental devido ao seu potencial de poluição de corpos d'água e riscos para a saúde pública, dessa forma, ao transformar esse resíduo em um recurso útil, podemos abordar essas preocupações de forma eficaz.

Além disso a produção de substrato a partir de biochar de lodo de esgoto pode reduzir a necessidade de exploração de recursos naturais não renováveis, como a turfa, que ainda tem sido frequentemente usada na fabricação de substratos para plantas, ajudando assim a conservar recursos preciosos e a mitigar os impactos ambientais associados à extração de recursos naturais.

Ao utilizar o biochar como matéria prima para a fabricação de substratos se espera contribuir para o alcance de diversos ODS, fornecendo uma abordagem sustentável e holística para o desenvolvimento e produção. Dentre os ODS atendidos com a utilização do biochar de lodo de esgoto pode-se citar o ODS 6 (Água Limpa e Saneamento) que envolve o tratamento adequado do lodo de esgoto, afim de evitar a contaminação da água e proteger a saúde pública. O ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis), que engloba a utilização de resíduos para criação de novos produtos, promovendo a sustentabilidade e contribuindo para um ciclo de produção mais eficiente e consciente. E com o ODS 15 (Vida Terrestre), que visa a diminuição da necessidade de recursos não renováveis, preservando assim os recursos naturais e habitat de seres vivos.

Portanto, a produção de substratos a partir de biochar de lodo de esgoto não só resolve problemas de gestão de resíduos, mas também impulsiona a sustentabilidade, alinhando-se com metas globais para um futuro mais equilibrado e saudável.

3 Hipótese

Substratos desenvolvidos a partir de biochar de lodos de estações de tratamento de esgoto anaeróbios e aeróbios, associados a resíduos agroindustriais, são eficientes para a produção de mudas de eucalipto.

4 Objetivos

4.1. Geral

Avaliar a eficiência agronômica e os atributos químicos e físico-hídricos de substratos formulados com biochar de LETE para mudas de eucalipto.

4.2. Específicos

Realizar a caracterização química e físico-hídrica de substratos formulados com biochar de lodo de esgoto aeróbio e anaeróbio, ajustados para a produção de mudas de eucalipto.

Avaliar a performance agronômica de substratos formulados com biochar de lodo de esgoto aeróbio e anaeróbio, em comparação com formulações comerciais, para duas espécies da cultura do eucalipto em casa de vegetação.

5 Capítulo 1: Atributos físico-hídricos e químicos de substratos à base de biochar de lodo de estação de tratamento de esgoto (LETE) aeróbio e anaeróbio na produção de mudas de eucalipto

5.1 Introdução

A análise e o ajuste dos atributos físicos e químicos dos substratos são cruciais para verificação e padronização dos insumos, oferecendo aos produtores agrícolas informações essenciais para uma escolha consciente na aquisição e utilização desses materiais. Segundo Verdonck (1983), o ajuste prévio das características físicas tem uma importância primordial nos substratos, pois as relações entre água e ar permanecem estáveis ao longo do cultivo. Uma vez que o substrato é colocado no recipiente, suas características físicas se alteram pouco ao longo do ciclo da cultura. Dessa forma, a porosidade total, densidade seca, espaço de aeração e capacidade de retenção de água estão entre os principais atributos a serem ajustados em um substrato. Esses atributos são essenciais para fornecer um ambiente propício para o sistema radicular, permitindo a circulação de ar e suprimento de água de maneira adequada.

Enquanto as propriedades físicas do substrato geralmente permanecem relativamente estáveis após o plantio da muda, as propriedades químicas têm potencial para serem alteradas. Uma vez que a planta está estabelecida, é mais desafiador modificar suas características físicas, ao passo que ajustes nas propriedades químicas podem ser realizados com maior viabilidade e flexibilidade ao longo do ciclo de cultivo.

As características químicas dos substratos estão intrinsecamente ligadas à sua habilidade de disponibilizar nutrientes essenciais para o desenvolvimento adequado das plantas. A análise química dos substratos permite inferir sobre as respostas agronômicas da formulação, indicação da necessidade de adubações complementares, influenciando diretamente na qualidade dos substratos e, por conseguinte, no desenvolvimento das plantas (Santos *et al.*, 2014).

A avaliação e ajuste dos atributos físicos e químicos do substrato é vital para garantir condições ideais de cultivo para novas mudas. Destaca-se assim a importância de se selecionar, padronizar e monitorar os substratos utilizados no cultivo

de plantas, visando promover o ambiente mais propício e eficiente para o crescimento saudável e a produtividade das culturas.

5.2 Materiais e Métodos

5.2.1 Obtenção do biochar

Os LETEs aeróbio e anaeróbio foram obtidos na Estação de Tratamento de Esgoto de Rio Grande - RS (32°06'12" S e 52°11'02" W) e na Estação de Tratamento de Esgoto de Passo Fundo - RS (28°13'18,64"S e 52°22'7,13"W), respectivamente. A coleta e secagem de lotes representativos dos LETEs encontra-se descrita em Monteiro *et al.* (2019). Após a coleta, os LETEs foram distribuídos em caixas de fibra de vidro, formando uma camada de 10 cm de espessura de LETE. Na sequência, os materiais foram acondicionados no interior de uma estufa agrícola que possui cobertura em plástico transparente (200 micras), até atingir um teor de água inferior a 20%. Após a secagem, os LETEs aeróbio e anaeróbio foram armazenados, estando aptos para proceder a pirólise.

Os LETEs foram submetidos ao processo de pirólise em carbonizador artesanal com suprimento parcial de ar, em que a temperatura no interior do equipamento foi variável, operando entre 300-600 °C na porção central do equipamento, permanecendo nessa condição por aproximadamente três horas (Monteiro *et al.*, 2020). Após a pirólise, o biochar teve a sua granulometria padronizada em partículas inferiores a 2,0 mm por meio de moagem e peneiramento (Figura 3). Os tipos de biochar de LETE aeróbio e anaeróbio foram produzidos e caracterizados visando sua adequação físico-hídrica e química como matéria prima para substratos para plantas.

Figura 3: Biochar de lodo de esgoto anaeróbio (a) e aeróbio (b)



Fonte: Autora, 2024.

5.2.2 Formulação dos substratos (tratamentos)

Os substratos foram formulados a partir de biochar de LETE aeróbio e anaeróbio, e compostos ainda por uma combinação de três matérias primas adicionais (Mistura Base - MB): composto orgânico comercial classe B, casca de arroz carbonizada e vermiculita fina (<3 mm), na proporção de 33,33:43,33:23,33 (m:m), respectivamente (Monteiro *et al.*, 2019). A casca de arroz foi carbonizada em um carbonizador artesanal com suprimento parcial de ar por um período de seis horas (Figura 4).

Figura 4: Carbonização da casca de arroz em carbonizador artesanal



Fonte: Autora, 2024

Os substratos experimentais foram formulados com as três matérias primas e o biochar de LETE (Figura 5), resultando em onze combinações de proporções crescentes de biochar de LETE (T1-T11). Essas combinações foram ainda

comparadas com três substratos comerciais (CM1, CM2 e CM3) (Tabela 3). Foram delineados dois experimentos, sendo que no primeiro foi utilizado o biochar de LETE aeróbio e no segundo o biochar de LETE anaeróbio.

Figura 5: (a) Matérias Primas e o biochar anaeróbio e aeróbio e (b) mistura base



Fonte: Autora, 2024

Tabela 3: Substratos formulados com biochar de LETE anaeróbio e substratos comerciais

Substratos	Biochar de LETE	Mistura Base (MB)
	----- % (m:m) -----	
T1	0	100
T2	10	90
T3	20	80
T4	30	70
T5	40	60
T6	50	50
T7	60	40
T8	70	30
T9	80	20
T10	90	10
T11	100	0
CM1	Substrato comercial 1	
CM2	Substrato comercial 2	
CM3	Substrato comercial 3	

Fonte: Autora, 2024.

5.2.3 Caracterização química e físico-hídrica dos substratos

Foram determinadas as seguintes variáveis físico-hídricas das formulações desenvolvidas: densidade úmida e seca, porosidade total (PT), espaço de aeração (EA), água facilmente disponível (AFD), água tamponante (AT), água disponível (AD) e água remanescente (AR). As densidades (úmida e seca) foram determinadas pelo método da autocompactação (Brasil, 2007) enquanto que as variáveis PT, EA, AFD, AT, AD e AR foram determinadas conforme metodologia descrita por Fermino (2014).

A caracterização química foi realizada pelo Laboratório Laborsolo (Maringá - PR) onde foram determinados os teores extraíveis de macro e micronutrientes, além do pH e condutividade elétrica (CE) das formulações.

Os lotes de biochar anaeróbio e aeróbio, após terem sua granulometria padronizada em partículas inferiores a 2,0 mm, bem como da mistura base, foram analisados quanto aos seus atributos físico-químicos (Tabela 4).

Tabela 4: Análise físico-hídrica do biochar de LETE anaeróbio, aeróbio e da mistura base

Parâmetros	Biochar de LETE anaeróbio	Biochar de LETE aeróbio	Mistura Base ¹
	Caracterização físico-hídrica		
Densidade Úmida (kg m ⁻³)	728,41	718,85	275,86
Densidade Seca (kg m ⁻³)	713,20	692,84	216,30
Porosidade Total (%)	59,51	58,11	77,71
Espaço de Aeração (%)	1,83	16,76	31,16
Água Facilmente Disponível (%)	20,08	9,96	17,44
Água Tamponante (%)	11,22	3,81	2,78
Água Disponível (%)	31,30	13,77	20,22
Água Remanescente (%)	26,39	27,58	26,33
Caracterização química			
pH	4,63	6,98	7,56
CE (mS cm ⁻¹)	3,39	1,24	0,51
Fósforo extraível (mg kg ⁻¹)	44,00	3.070,50	1.373,79
Potássio extraível (mg kg ⁻¹)	98,94	913,20	892,56
Cálcio extraível (mg kg ⁻¹)	5.116,00	3.665,00	2.889,00
Magnésio extraível (mg kg ⁻¹)	183,90	2.453,00	916,10
Enxofre extraível (mg kg ⁻¹)	5.119,00	2.089,00	46,60
Boro extraível (mg kg ⁻¹)	1,52	11,36	1,86
Cobre extraível (mg kg ⁻¹)	0,13	3,18	1,28
Ferro extraível (mg kg ⁻¹)	336,50	281,90	271,40

Manganês extraível (mg kg ⁻¹)	13,68	55,46	155,50
Molibdênio extraível (mg kg ⁻¹)	N.D.	N.D.	N.D.
Sódio extraível (mg kg ⁻¹)	25,07	47,58	115,40
Zinco extraível (mg kg ⁻¹)	134,50	139,00	41,55
Cádmio extraível (mg kg ⁻¹)	0,14	0,05	N.D.
Chumbo extraível (mg kg ⁻¹)	N.D.	N.D.	N.D.
Cromo extraível (mg kg ⁻¹)	0,28	0,22	1,65
Níquel extraível (mg kg ⁻¹)	0,53	1,88	3,55
Cobalto extraível (mg kg ⁻¹)	0,79	0,40	0,35

Contaminantes patogênicos²

Coliformes Termotolerantes (NMP/g de MS)	Ausente	Ausente	-
Ovos viáveis de helmintos (nº/g de ST)	Ausente	Ausente	-
Salmonella sp	Ausente	Ausente	-
Vírus entéricos (g/ST)	Ausente	Ausente	-

¹ Mistura Base = 33,33% composto orgânico comercial classe B + 43,33% casca de arroz carbonizada + 23,33% vermiculita.

² Fonte: Monteiro (2019)

* N.D.= Não Detectado

Fonte: Autora, 2024.

5.6 Análise estatística

Os conjuntos de dados obtidos na caracterização físico-hídrica e química dos substratos foram submetidos à verificação da normalidade de distribuição e da presença de valores discrepantes através do software Jamovi (Versão 2.4) (Jamovi, 2023). A seguir, foi realizada a análise da variância e, para as variáveis com efeitos de tratamento significativos, procedeu-se a análise de regressão polinomial a 5% de significância utilizando-se a planilha eletrônica Microsoft Excel® 2016.

5.7 Resultados e Discussão

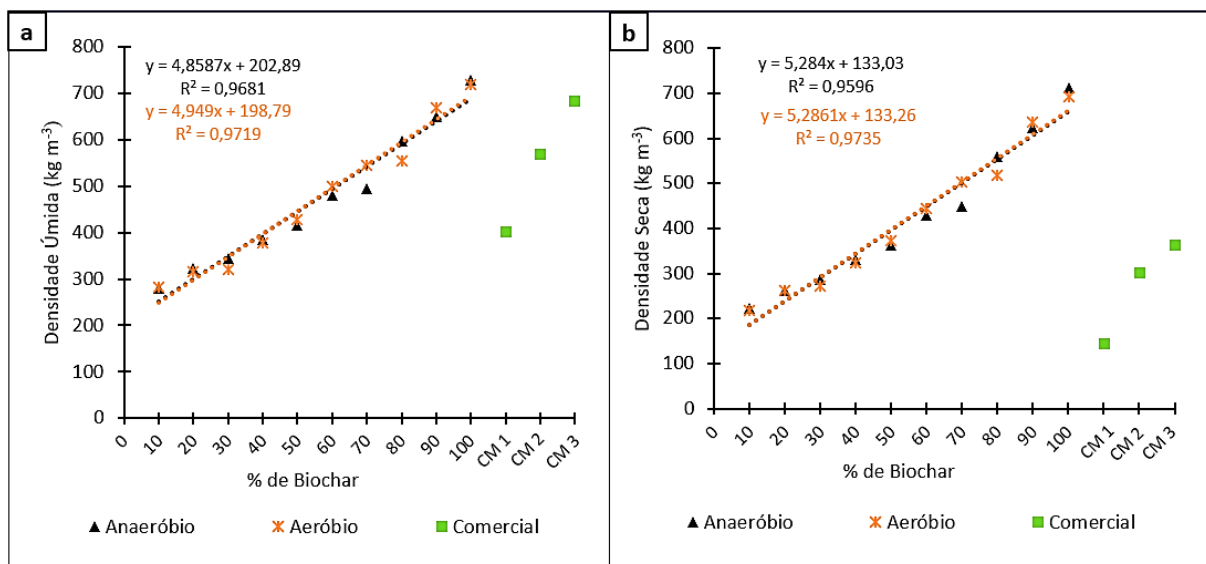
5.7.1 Caracterização físico-hídrica das formulações

As proporções de biochar aeróbio e anaeróbio influenciaram nas características físico-hídricas dos substratos. Observa-se que o aumento do teor de biochar na formulação está associado a um aumento tanto na densidade úmida quanto na densidade seca das formulações (Figura 6). Por outro lado, observa-se uma redução na Porosidade Total e no Espaço de Aeração (Figura 7-a,b) à medida que o teor de biochar aumenta. Tanto Monteiro (2019) em estudos com biochar de LETE anaeróbio

e aeróbio quanto Caldeira *et al.* (2013) em estudos com LETE anaeróbio observaram esse comportamento.

De acordo com Fermino (2014), as faixas recomendadas como ideais de densidade seca de substratos utilizados para cultivos em tubetes de até 15 cm de comprimento são de 250 a 400 kg m⁻³. Nesse contexto, é possível notar que os substratos que apresentam incrementos de biochar da ordem de 20 a 50% encontram-se dentro da faixa recomendada. Contudo, entre os substratos comerciais avaliados, somente o Comercial 1 ficou abaixo da faixa considerada ideal.

Figura 6: Densidade Úmida e Seca para os substratos formulados com biochar de LETE aeróbio e anaeróbio



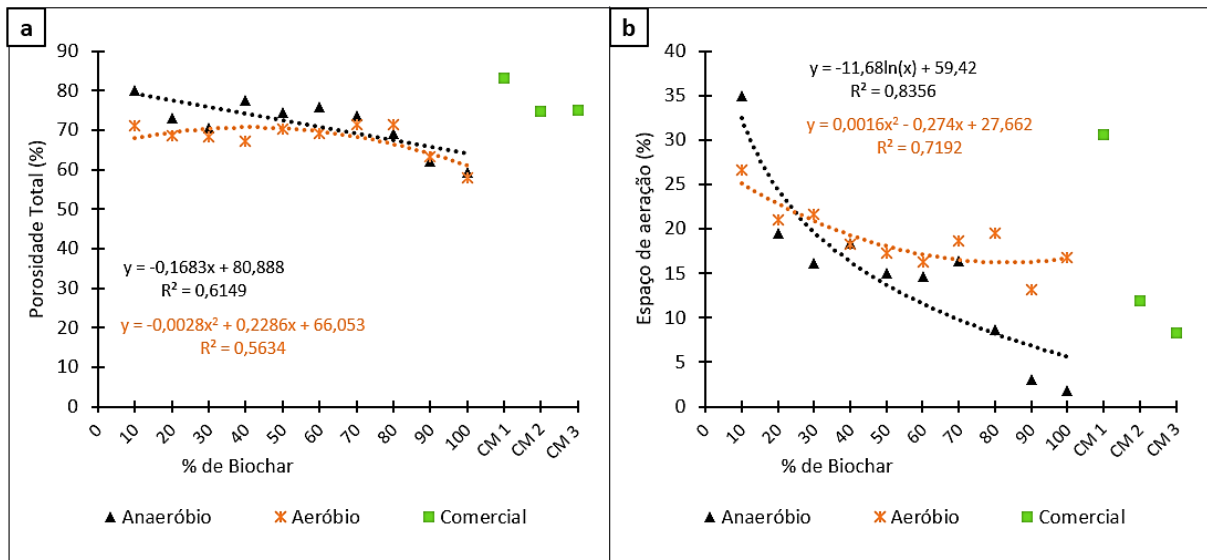
Fonte: Autora, 2024.

Em relação a porosidade total (PT) verifica-se que os substratos formulados a partir de biochar de LETE anaeróbio (Figura 5-a) apresentam valores maiores, variando de 59,51 a 80,07%, enquanto que os substratos formulados a partir de LETE aeróbio apresentaram uma variação de 58,11 a 71,17%. De acordo com De Boodt *et al.* (1972), o ideal é que um substrato atinja uma PT em torno de 85%, dessa forma observa-se que tanto os substratos formulados quanto os comerciais apresentam porcentagens abaixo desse valor. Além disso, para ambos os tipos de LETE, houve redução linear com o aumento da dose de LETE.

Na Figura 7-b observa-se que à medida que a concentração de biochar nos substratos aumenta, há uma redução quadrática (LETE aeróbio) e de comportamento logarítmico (LETE anaeróbio) no espaço de aeração. De acordo com De Boodt *et al.* (1972), um substrato considerado ideal deve apresentar um espaço de aeração na

faixa de 20 a 30%. Assim, os substratos que contêm 20% e 10, 20 e 30% de LETE anaeróbico e LETE aeróbico, respectivamente, encontram-se dentro dessa faixa. Entretanto, entre os substratos comerciais, apenas o CM 1 atinge essa condição ideal de espaço de aeração.

Figura 7: Porosidade Total e Espaço de Aeração para os substratos formulados com biochar de LETE aeróbico e anaeróbico



Fonte: Autora, 2024.

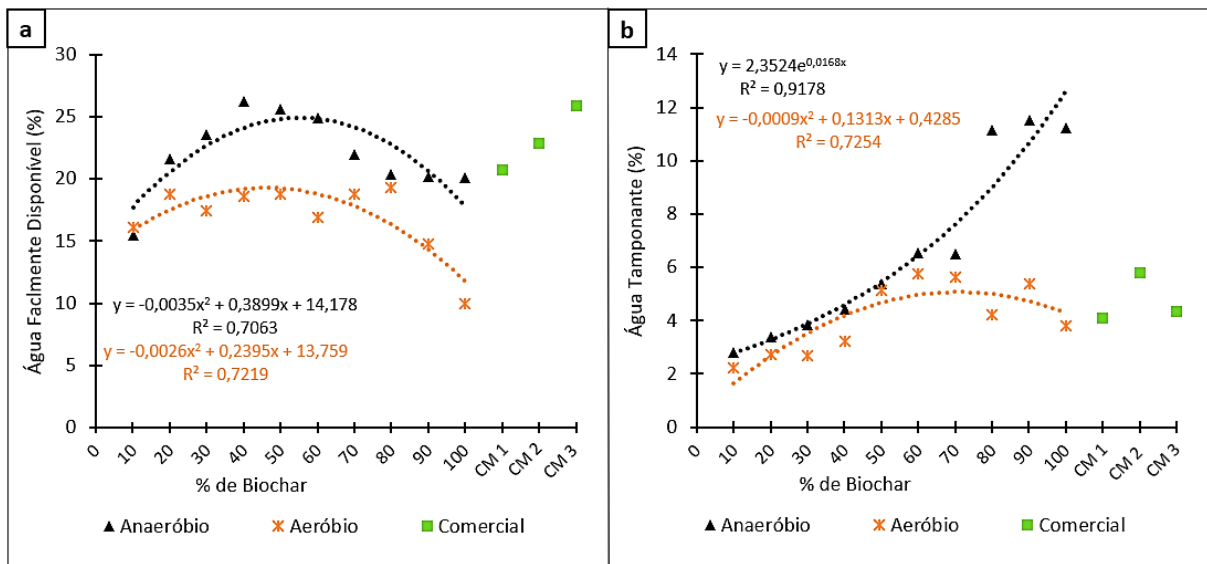
Tanto a PT quanto o EA podem sofrer influências da densidade dos materiais utilizados para compor as formulações. A PT representa a diferença entre volume total e o volume ocupado pelos sólidos da amostra, enquanto que o EA consiste no volume que é ocupado pelo ar na amostra após ser submetido a uma tensão de 1 kPa e geralmente está associado a proporção de macroporos. A partir da análise dos dados, pode-se inferir que o processo de pirólise do LETE proporcionou um material com menor volume de macroporos em comparação aos microporos. Paula Jr. *et al.* (2009) e Monteiro *et al.* (2017) em suas pesquisas observaram uma diminuição da PT, especialmente na macroporosidade, em substratos que tinham teores mais elevados de lodo de esgoto.

Fermino (2014) afirma que os substratos devem apresentar 20 a 30% de água facilmente disponível (AFD) para favorecer o desenvolvimento de mudas. Na Figura 8-a observa-se que os três substratos comerciais analisados e a maioria das formulações a base de LETE anaeróbico, com exceção do T2, com 10% de biochar, encontram-se dentro da faixa recomendada, enquanto que nas formulações a partir de biochar de LETE aeróbico somente as formulações T6 e T7, com 50 e 60% de

biochar encontram-se dentro da faixa recomendada. Para ambos os tipos de LETE, a AFD apresentou comportamento quadrático em relação às doses do material.

No que diz respeito à Água Tamponante (Figura 8-b), de Boodt *et al.* (1972) estabelecem que o valor ideal para esse atributo deve ser de 4% a 10%. Nota-se que, no caso do substrato à base de biochar de LETE anaeróbico, as formulações com teores de 40% a 70% encontram-se dentro da faixa recomendada. Nas formulações à base de biochar de LETE aeróbico, apenas as formulações com composições entre 50% e 90% de biochar estão em conformidade com essa recomendação. Em relação aos substratos comerciais, todos estão dentro da faixa ideal.

Figura 8: Valores de Água Facilmente Disponível e Água Tamponante para os substratos formulados com biochar de LETE aeróbico e anaeróbico



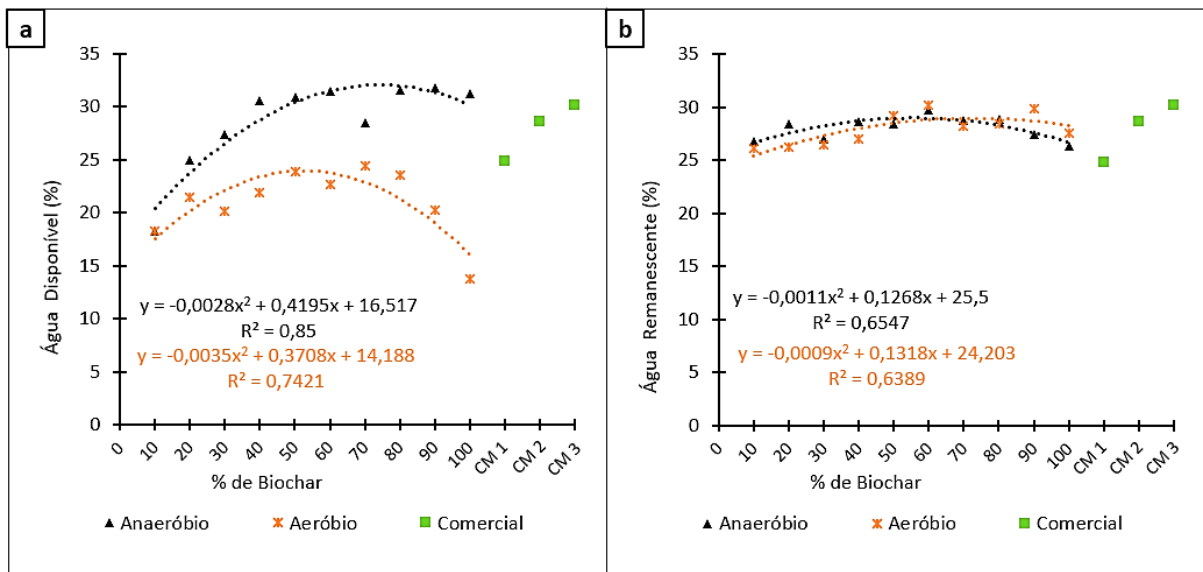
Fonte: Autora, 2024.

Quanto à Água Disponível (AD) (Figura 9-a), novamente e assim como o observado para a AFD, nota-se que os substratos à base de biochar de LETE anaeróbico apresentaram comportamento quadrático conforme aumenta a porcentagem de biochar adicionada. Verifica-se que a AD variou de 18,33% no substrato com a menor quantidade de biochar (10%) para 31,78% naquele com a maior proporção (100%). Em contrapartida, nos substratos à base de biochar de LETE aeróbico, observa-se um crescimento da AD até a formulação com 50% de biochar, apresentando um AD de 26,73%, seguido por um decréscimo para 13,77% até a formulação com 100% de biochar.

A Água Remanescente (AR) refere-se à quantidade de água que permanece no substrato ou solo após esta ser submetida a altas tensões (10 kPa ou superiores),

além disso ela está associada à água retida nos microporos (Fermino, 2014). Conforme a Figura 9-b, observa-se que tanto os substratos de biochar de LETE anaeróbio quanto de LETE aeróbio apresentam valores semelhantes de AR e sem grandes variações em relação as diferentes proporções de biochar, oscilando de 26,16% a 27,58%. Em contraste, os substratos comerciais exibem valores superiores aos formulados com biochar, variando de 27,59% a 36,74%. Todos os valores obtidos para os substratos formulados com biochar de LETE anaeróbio e aeróbio, bem como para o substrato comercial 1, encontram-se dentro da faixa recomendada (20 a 30% - De Boodt; Verdonck, 1972). Apesar da AR não estar disponível para a maioria das plantas, é importante considerá-la porque este atributo tem influência na condutividade elétrica, na capacidade térmica e na condutividade hidráulica dos substratos.

Figura 9: Valores de Água Disponível e Água Remanescente para os substratos formulados com biochar de LETE aeróbio e anaeróbio



Fonte: Autora, 2024.

5.7.2 Caracterização química das formulações

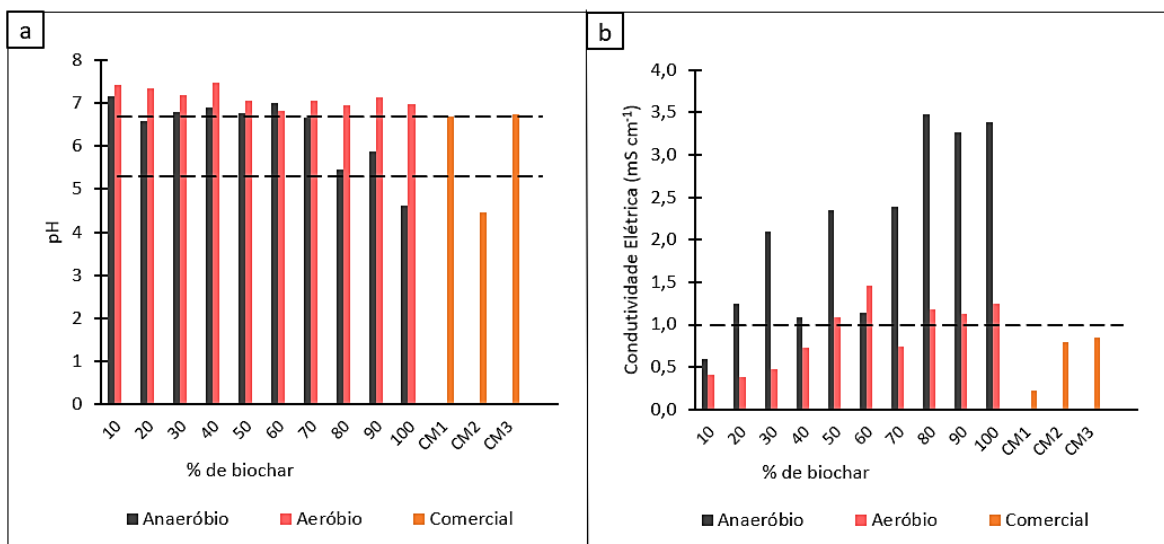
A partir da análise do potencial hidrogeniônico (pH) (Figura 10) observa-se que os substratos formulados com o LETE anaeróbio estudado apresentaram um caráter mais ácido enquanto que os formulados com LETE aeróbio caracterizam-se por serem neutros a alcalinos. Quanto às recomendações de pH, Gonçalves e Poggiani (1996) afirmam que a faixa adequada seria de 5,5 a 6,5 e Ferreira e Moraes (2021) recomendam um pH de 5,0 a 6,0 como sendo o mais favorável para a cultura do

eucalipto. Já Bitencourt *et al.* (2022) verificaram em seus estudos que substratos que apresentaram um pH de 5,3 a 6,7 foram os que proporcionaram os melhores desempenhos para a cultura de eucalipto. Observa-se que somente os substratos formulados com 20%, 70%, 80% e 90% de LETE anaeróbio estão plenamente alinhados com as recomendações da literatura, enquanto que todas as demais formulações de substratos, como todas as produzidas com LETE aeróbio, bem como os três substratos comerciais e as demais formulações de LETE anaeróbio estão situadas fora da faixa recomendada, situando-se abaixo ou acima das recomendações literárias.

Já a condutividade elétrica (CE) refere-se à concentração de sais presentes no substrato ou solução. Na Figura 10-b pode-se observar que a CE, para o substrato de biochar de LETE de anaeróbio variou de 0,60 à 3,39 mS cm⁻¹ enquanto que o substrato a base de biochar de LETE aeróbio apresentou uma variação menor, de 0,41 à 1,24 mS cm⁻¹.

Todos os três substratos comerciais, e os substratos que continham até 40% e 10% de biochar de LETE aeróbio e anaeróbio, respectivamente, apresentaram uma CE dentro do desejável, ou seja, até 1,0 mS cm⁻¹ (Gonçalves *et al.*, 2000). As demais formulações estão fora da faixa recomendada, possivelmente por ter maiores concentrações de biochar de LETE, que possui uma CE mais elevada (Tabela 4). Segundo Monteiro (2019) o biochar possui uma CE elevada devido à grande carga de nutrientes, principalmente de fósforo, enxofre, cobre, zinco e ferro.

Figura 10: Valores de pH e Condutividade Elétrica para os substratos formulados com biochar de LETE aeróbio e anaeróbio

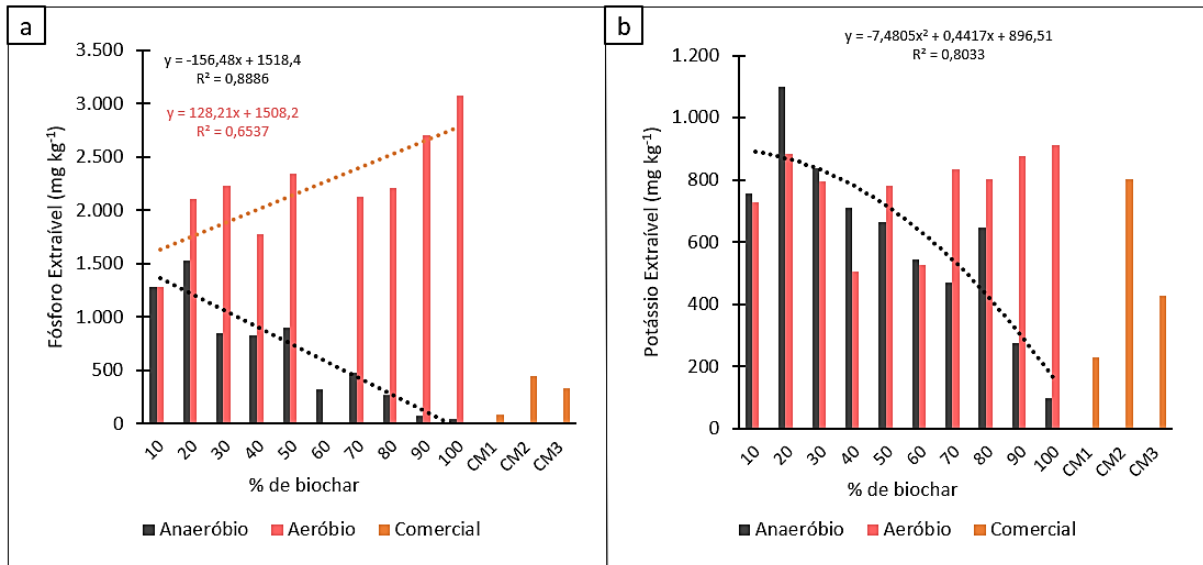


Fonte: Autora, 2024

Considerando os teores de nutrientes que compõem as formulações avaliadas, o aumento da proporção de biochar de LETE na composição dos substratos influenciou de forma muito distinta as concentrações de Fósforo (P) (Figura 11-a). Verifica-se um decréscimo linear com o aumento da concentração de biochar de LETE anaeróbio, enquanto que na formulação com biochar de LETE aeróbio ocorre um aumento linear. Esse resultado ocorreu devido à baixa e alta concentração de P extraível no LETE anaeróbio e aeróbio, respectivamente. Segundo Carvalho (2018) o P tende a se tornar insolúvel na forma de fosfato de Ferro ou de Cálcio em condições em que o pH é inferior a 6,5, fator que pode ser o responsável pelo biochar de LETE anaeróbio apresentar baixas concentrações de P solúvel, na medida que a sua proporção aumenta nas formulações.

Em relação ao Potássio (K), observa-se uma redução significativa em sua concentração de forma quadrática à medida que a concentração de LETE anaeróbio aumenta (Figura 11-b), enquanto que para o LETE aeróbio não houve incremento significativo em relação ao aumento da dose de biochar. Este comportamento pode ser atribuído às baixas concentrações de K extraível no biochar de LETE anaeróbio (Tabela 4). Além disso, a formulação "base" possui concentrações mais elevadas de K em relação ao biochar de LETE anaeróbio (Tabela 4), sendo a principal fonte desse elemento neste tipo de substrato. Portanto, à medida que a proporção da mistura padrão é reduzida, observa-se uma correspondente diminuição nos níveis de K. Quanto ao substrato à base de biochar de LETE aeróbio, não foram identificados efeitos nos níveis de K com o aumento da proporção de biochar nos substratos. Esse fenômeno possivelmente pode ser atribuído à proximidade nos teores de Potássio extraível que a Mistura Base e o biochar de LETE aeróbio apresentam (Tabela 4).

Figura 11: Teores de Fósforo e Potássio extraível dos substratos formulados com biochar de LETE aeróbio e anaeróbio

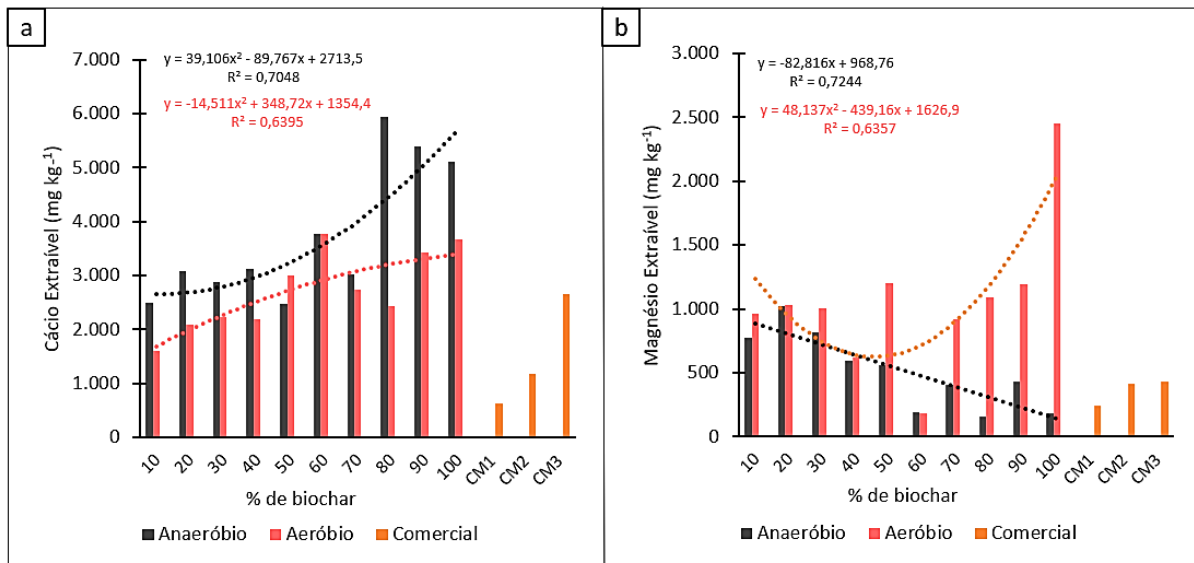


*Valor de Fósforo extraível discrepante na dose de 60% biochar LETE anaeróbio.
Fonte: Autora, 2024.

Conforme a Figura 12-a, observa-se que a quantidade de Cálcio extraível aumentou de forma quadrática, tanto para o substrato formulado a base de biochar de LETE anaeróbio quanto de LETE aeróbio. Esse aumento pode ser atribuído, possivelmente, ao acréscimo de biochar, uma vez que este componente exibe teores superiores de Cálcio em comparação com a Mistura Base. Os substratos comerciais apresentaram os menores teores de Cálcio quando comparados com o substrato de LETE anaeróbio.

Quanto ao Magnésio extraível (Figura 12-b) foi observado um decréscimo linear dos teores à medida que a proporção de biochar de LETE anaeróbio aumentava nos substratos. Por outro lado, observou-se um comportamento quadrático nos substratos contendo biochar de LETE aeróbio, decrescendo seus teores até a dose de 40% de biochar. Essa variação provavelmente está relacionada aos teores iniciais de Magnésio no biochar de LETE anaeróbio e aeróbio.

Figura 12: Teores de Cálcio e Magnésio extraível dos substratos formulados com biochar de LETE aeróbio e anaeróbio

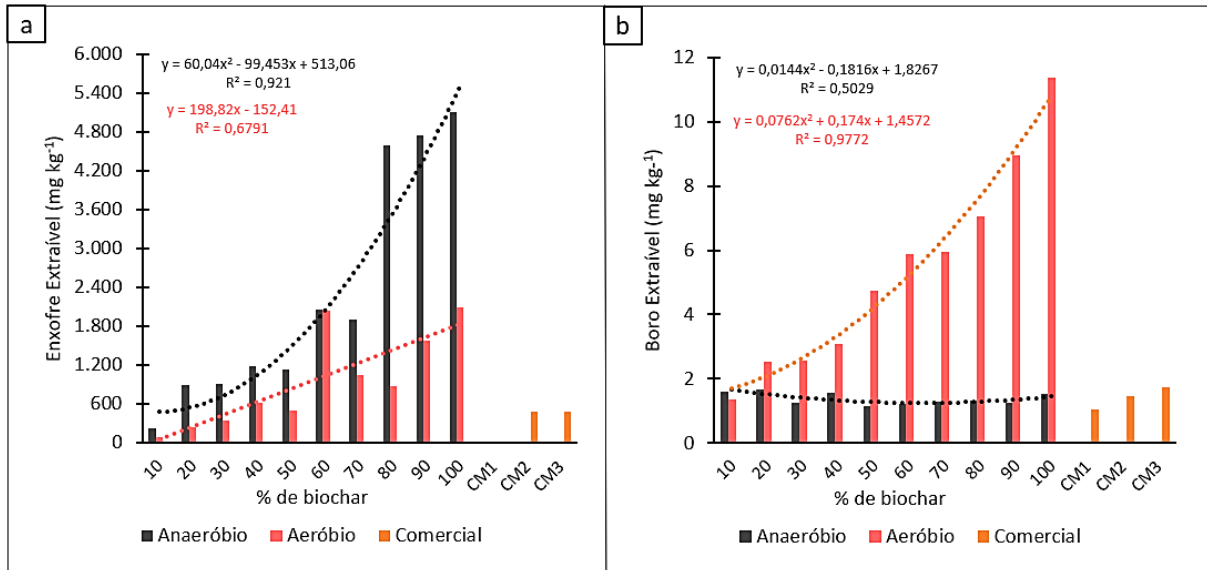


Fonte: Autora, 2024.

Em relação ao Enxofre (S) extraível (Figura 13-a), observou-se uma tendência de aumento, seguindo um padrão quadrático para a adição de LETE anaeróbio e linear para LETE aeróbio nos substratos. Esses resultados podem ser explicados pela baixa concentração de S na Mistura Base e elevada concentração nos LETEs anaeróbio e aeróbio, onde o LETE anaeróbio apresentou 2 vezes mais S que o aeróbio. Além disso, destaca-se que o S tem uma relação estreita com o pH do material, de modo que valores baixos de pH são geralmente um reflexo do alto teor de enxofre no LETE. Em relação aos substratos comerciais, destaca-se que todos exibiram valores significativamente inferiores (variando de 11,86 a 474 mg kg⁻¹), quando comparados aos formulados com LETE.

Quanto aos micronutrientes, destaca-se que o aumento na proporção de biochar de LETE aeróbio e anaeróbio influenciou na quantidade de Boro extraível (Figura 13-b) nos substratos formulados. Notou-se um incremento mais expressivo nos substratos de LETE aeróbio, comportamento que ocorreu devido à presença mais substancial de Boro nesse biochar (Tabela 4). Em contraste, os três substratos comerciais exibiram valores semelhantes aos dos substratos elaborados com biochar de LETE anaeróbio, porém consideravelmente inferiores aos formulados com biochar de LETE aeróbio.

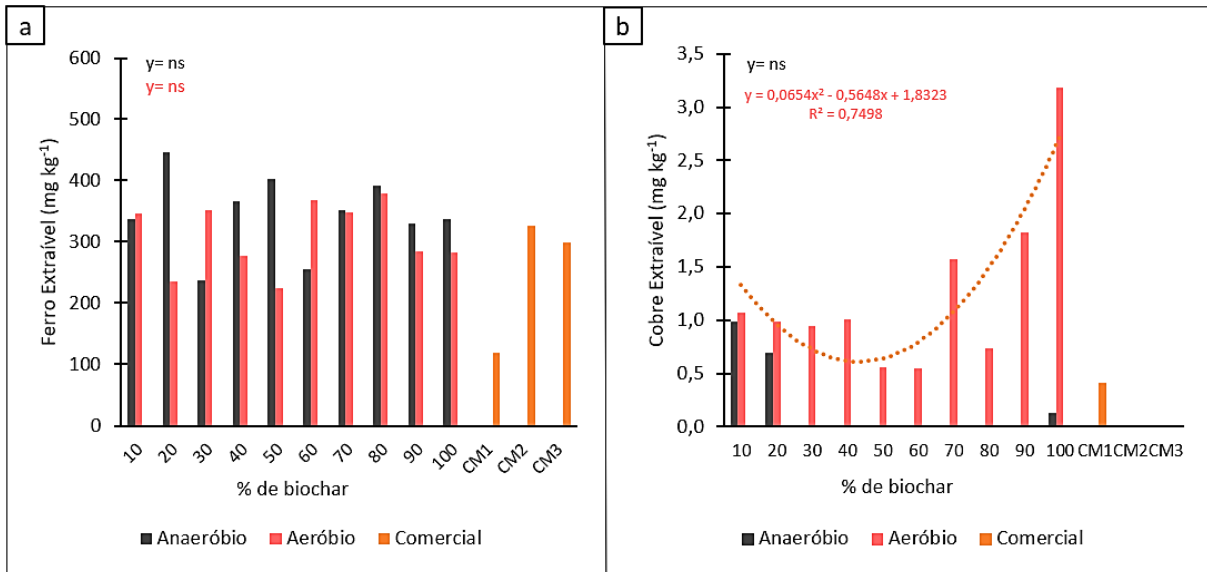
Figura 13: Concentrações de Enxofre e Boro extraível dos substratos formulados com biochar de LETE aeróbio e anaeróbio



Fonte: Autora, 2024.

Em relação ao Cobre Extraível, verificou-se um aumento nos substratos formulados com biochar de LETE aeróbio (Figura 14-b). No entanto, nas formulações à base de LETE anaeróbio, a presença de Cobre foi observada apenas nos tratamentos com concentrações de 10%, 20% e 100% de biochar. Tal comportamento possivelmente decorreu da baixa concentração desse micronutriente no biochar de anaeróbio (Tabela 4). Além disso, os substratos comerciais CM2 e CM3 não apresentaram teores detectáveis de Cobre extraível, enquanto o substrato comercial CM1, por sua vez, apresentou teor detectável ($\sim 0,4 \text{ mg kg}^{-1}$) esse micronutriente. Quanto à presença de Ferro extraível (Figura 14-a), observou-se que o aumento da proporção de biochar de LETE anaeróbio e de LETE aeróbio na composição dos substratos não tiveram influência nas concentrações desse micronutriente. Dentre os substratos comerciais o CM1 foi o que apresentou menor quantidade de Ferro dentre todas as formulações analisadas.

Figura 14: Quantidade de Cobre e Ferro extraível dos substratos formulados com biochar de LETE aeróbio e anaeróbio



* Teores de Cobre extraível não detectados nas doses de 30 a 90% biochar LETE anaeróbio e em CM2 e CM3.

Fonte: Autora, 2024.

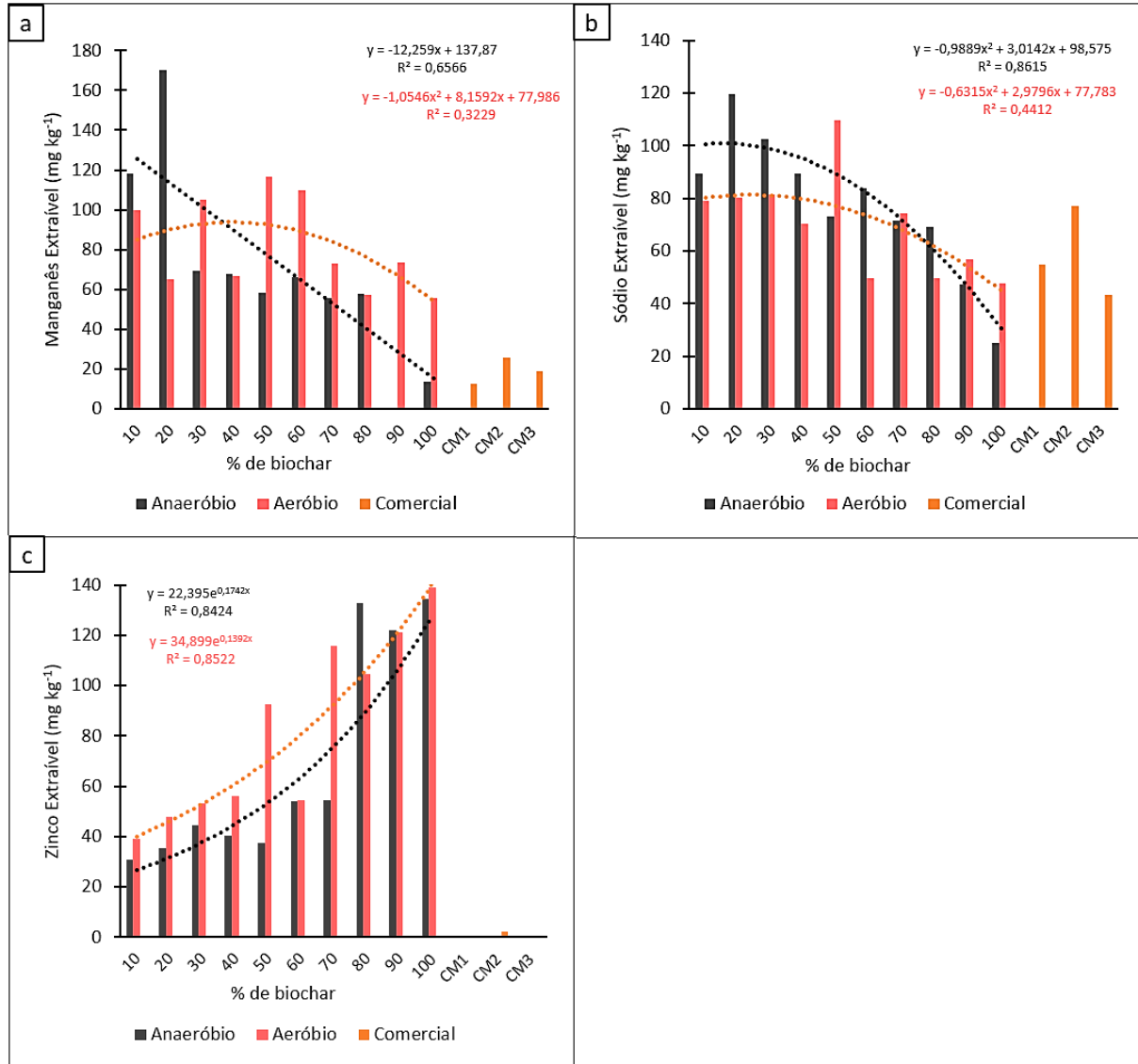
Para o Manganês (Mn) verificou-se uma diminuição conforme o aumento da proporção de Biochar de aeróbio nos substratos (Figura 15-a) e para as formulações realizadas a partir de LETE anaeróbio (Figura 15-b) observa-se uma redução linear. Dentre todos os substratos analisados, nota-se que os substratos comerciais apresentam as menores quantidades de Mn, sendo o comercial CM1 o que possui a menor quantidade entre todos os substratos.

No que diz respeito ao Molibdênio (Mo), não foi identificada presença da forma extraível desse elemento em nenhum dos substratos analisados. Já em relação à concentração de Sódio (Na) observa-se que os substratos derivados de ambos os LETEs (aeróbio e anaeróbio) ocorreu redução quadrática à medida que ocorre o aumento de biochar nas formulações (Figura 15-b). Essa tendência é possivelmente decorrente da Mistura Base, por ser a principal fonte de Na nas formulações, e com a sua redução, ocorre conseqüentemente a diminuição dos níveis de Na.

As formulações contendo biochar de LETE anaeróbio e biochar de LETE aeróbio demonstraram um aumento exponencial na quantidade de Zinco (Zn) extraível (Figura 15-c) à medida que a proporção de biochar foi incrementada nas formulações. Em contrapartida, os substratos comerciais exibiram valores mais baixos (variando de 0,30 a 2,07 mg kg⁻¹), em comparação com aqueles formulados com biochar,

destacando a contribuição significativa do biochar de LETE anaeróbico e aeróbico como principal fonte de Zn.

Figura 15: Quantidade de Manganês, Sódio e Zinco extraível dos substratos formulados com biochar de LETE aeróbico e anaeróbico



Fonte: Autora, 2024.

Avaliou-se ainda os substratos quanto a presença de contaminantes como Cádmio, Chumbo, Cromo e Níquel, visto que estes metais pesados são tóxicos para as plantas e podem interferir em processos metabólicos quando as suas concentrações estão acima do permitido. A Instrução Normativa SDA Nº 07/2016 estabelece os limites máximos de contaminantes admitidos em substrato para plantas e ao comparar estes valores com os encontrados nos substratos em estudo (Tabela 5), tanto os substratos formulados com os dois tipos de biochar de LETE quanto as

três formulações comerciais apresentam concentrações abaixo dos limites máximos estipulados pela Instrução Normativa. O resultado ressalta a conformidade dos substratos em estudo com as regulamentações ambientais e agrícolas vigentes, garantindo um ambiente de cultivo seguro e livre de contaminações prejudiciais ao desenvolvimento das plantas.

Tabela 5: Contaminantes para os substratos formulados com biochar de LETE aeróbio e anaeróbio

% de biochar	Contaminantes (mg kg ⁻¹)							
	Cádmio		Chumbo		Cromo		Níquel	
	Anaeróbio	Aeróbio	Anaeróbio	Aeróbio	Anaeróbio	Aeróbio	Anaeróbio	Aeróbio
10	N.D.	0,01	N.D.	N.D.	1,63	2,7	2,73	3,85
20	0,01	0,01	N.D.	N.D.	0,88	1,61	1,89	2,45
30	N.D.	0,01	N.D.	N.D.	0,86	1,28	1,88	3,13
40	0,02	0,01	N.D.	N.D.	0,76	1,21	1,59	2,53
50	0,03	N.D.	N.D.	N.D.	0,7	0,49	1,5	1,66
60	0,04	N.D.	N.D.	N.D.	0,37	0,36	1,13	1,12
70	0,04	0,03	N.D.	N.D.	0,43	0,42	1,04	1,62
80	0,07	N.D.	N.D.	N.D.	0,31	0,58	0,89	2,16
90	0,03	0,04	N.D.	N.D.	0,4	0,28	0,81	3,3
100	0,14	0,05	N.D.	N.D.	0,28	0,22	0,53	1,88
CM1	N.D.		0,02		2,04		4,79	
CM2	N.D.		N.D.		0,17		0,11	
CM3	N.D.		N.D.		0,16		0,22	
Limite Máximo ¹	20,00		300,00		500,00		175,00	

* ND= Não detectado

¹ Instrução Normativa SDA Nº 27/2006

Fonte: Autora, 2024.

5.7.3 Conclusões

De maneira geral, observou-se que as propriedades físico-hídricas dos substratos foram influenciadas pela porcentagem de biochar adicionada à formulação.

O biochar proporcionou um aumento na Densidade Úmida e Seca, na Água Facilmente Disponível, na Água Tamponante, na Água Disponível e na Água Remanescente, mas por outro lado, constatou-se uma diminuição na porosidade total.

Quanto à caracterização química, o biochar de LETE influencia na disponibilidade dos macronutrientes e micronutrientes, alguns de forma mais expressiva do que outros.

A inclusão de biochar aeróbio nas formulações de substrato resultou em um aumento dos macronutrientes extraíveis, tais como ferro, potássio, cálcio, magnésio e enxofre. Por outro lado, o biochar anaeróbio provocou um aumento apenas na disponibilidade de cálcio e enxofre. Em relação aos micronutrientes tanto o biochar anaeróbio quanto aeróbio proporcionaram o aumento de boro, cobre e zinco nas formulações dos substratos.

Em relação aos contaminantes inorgânicos analisados, os substratos avaliados apresentaram concentrações inferiores aos limites determinados pela legislação.

Os resultados desse estudo reforçam a viabilidade da utilização de substratos à base de biochar de LETE anaeróbio e aeróbio como base eficiente e segura para o desenvolvimento de meios de cultivo para plantas.

6 Capítulo 2: Desempenho agrônômico de mudas de eucalipto cultivadas em substratos à base de biochar de lodo de estação de tratamento de esgoto (LETE) aeróbio e anaeróbio

6.1 Introdução

O cultivo de eucalipto foi introduzido no Brasil em 1904 com o intuito de proporcionar uma fonte de madeira de rápido desenvolvimento e tornar possível o seu uso em grande escala (Martini, 2010). O eucalipto foi rapidamente aceito, de modo que o seu cultivo pelo país expandiu devido ao crescimento rápido das árvores, alta produtividade, e possibilidade de produzir diversos produtos de interesse geral: papel, celulose, móveis, painéis de madeira, pisos, carvão, construção civil, dentre outros (Amorim, 2021; Martini, 2010). Segundo dados disponibilizados pela Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ, 2023), o setor de florestas plantadas é responsável por gerar uma receita bruta anual de R\$ 260 bilhões, sendo o cultivo do eucalipto o responsável por uma parcela significativa desse montante.

As espécies de eucalipto mais plantadas e utilizadas no Brasil são o *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna*, *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus viminalis*, híbridos de *E. grandis* x *E. urophylla*, *Eucalyptus dunnii* e *Eucalyptus benthamii*, sendo que a adoção de cada espécie varia devido as características especiais de suas madeiras e produtos derivados. A cultura do eucalipto está amplamente disseminada por todo o território nacional, e em 2022, o estado do Rio Grande do Sul ocupava a quinta posição em termos de área plantada. Desde 2014, observa-se um aumento consistente nessa extensão no RS, alcançando 600 mil hectares plantados em 2022 (IBÁ, 2023).

Para garantir um estabelecimento bem-sucedido e o crescimento saudável do Eucalipto, é crucial utilizar mudas de alta qualidade. É fundamental que essas mudas atendam a um padrão de qualidade destacado, apresentando crescimento robusto e sendo nutridas adequadamente, a fim de resistir e prosperar nas áreas de plantio (Wendling *et al.*, 2021). Neste sentido, é imprescindível contar com substratos eficientes, pois eles exercem influência sobre a qualidade das mudas nos viveiros. No mercado, há uma variedade de matérias primas disponíveis para a formulação dos substratos, incluindo materiais inertes e orgânicos. Geralmente, realiza-se a combinação de dois ou mais materiais na sua formulação, variando as proporções de

acordo com suas características físicas, o sistema de produção de mudas, a disponibilidade e o custo de produção e/ou aquisição (Wendling *et al.*, 2021).

Estudos sobre utilização de LETEs vem se destacando por viabilizar a sua reciclagem e estabelecer uma finalidade a um material produzido de modo continuado. No entanto, tem o seu uso limitado por legislação específica quando o LETE está na sua forma bruta, ou seja, não estabilizado e sanitizado (Araujo, 2022; Keherwald, 2021; Souza, 2015). Dessa forma, é oportuno e inovador processar adequadamente lotes de LETE considerando suas diferentes tipologias e características físico-químicas, diferenciando-os pela sua origem (aeróbia e anaeróbia), e convertendo-os em biochar. Sendo assim, estudos sobre a utilização do biochar de LETE como substrato para cultivo de mudas (Gonzaga, 2018; Monteiro, 2019; Monteiro, 2020; Rodrigues, 2017) vêm demonstrando formas viáveis para sua utilização. Entretanto, a utilização do biochar de LETE aeróbio e anaeróbio como componente na formulação de substratos para as principais espécies da cultura do eucalipto, bem como o ajuste de formulações seguras e eficientes para essa cultura inexistem, principalmente quando se refere à realidade brasileira.

Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho de mudas de duas espécies de eucalipto, cultivadas em substratos à base de biochar de lodo de estação de tratamento de esgoto (LETE) aeróbio e anaeróbio.

6.2 Materiais e Métodos

6.2.1 Matérias primas e formulações experimentais dos substratos

As matérias-primas utilizadas na elaboração de formulações experimentais foram: biochar de LETE anaeróbio e aeróbio, obtidas das estações de tratamento de esgoto de Passo Fundo - RS (anaeróbio) e Rio Grande - RS (aeróbio), conforme descrito em Monteiro (2019); Mistura Base, constituído por casca de arroz carbonizada, vermiculita e composto orgânico nas seguintes proporções 33,33:43,33:23,33 (m:m), respectivamente. Foram utilizados ainda três substratos comerciais como referência (testemunha).

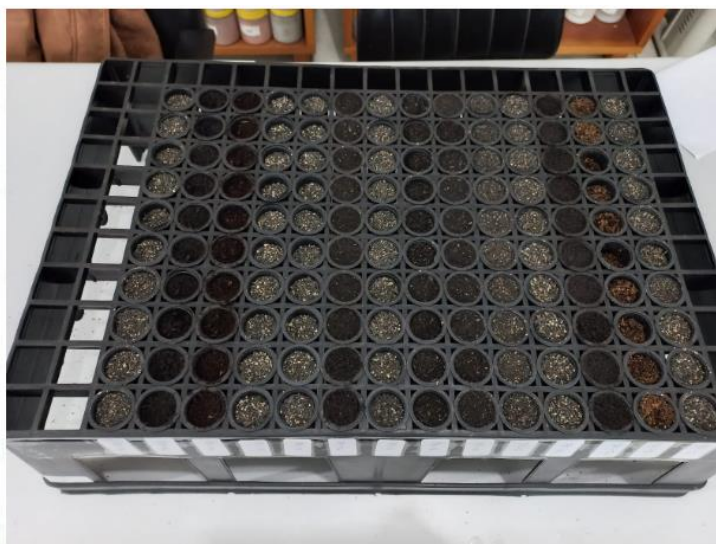
A partir do biochar de LETE, tanto anaeróbio quanto aeróbio, e da Mistura Base, procedeu-se à elaboração de dez formulações distintas de substratos para cada tipo de biochar, resultando em um total de 22 formulações. Estas formulações variaram

desde o T2, composto por 10% de biochar e 90% da mistura base, até o T11, que consistiu de 100% de biochar e sem a presença da Mistura Base. Além disso, foi utilizado ainda T1 como o substrato formulado somente com a Mistura Base. A inclusão de três substratos comerciais (CM1, CM2 e CM3), encontrados no mercado regional, serviu como referência na avaliação comparativa do desempenho das formulações experimentais elaboradas.

6.2.2 Experimentos de avaliação da performance agrônômica

Os experimentos foram implantados com espécies de *Eucalyptus Dunnii* e *Eucalyptus Saligna*, sendo conduzidos em casa de vegetação, com temperatura controlada (15 a 30 °C), na Estação Experimental Terras Baixas da Embrapa Clima Temperado (31°48'15" S e 52°24'44" W). Foram utilizados tubetes de polipropileno com volume de 50 cm³ e, previamente à semeadura das duas espécies de eucalipto, os tubetes foram preenchidos com os substratos contendo as diferentes concentrações de biochar (0-100%) de LETE aeróbio e anaeróbio, além de três substratos comerciais, de acordo com a densidade seca média de cada formulação (Figura 16).

Figura 16: Tubetes preenchidos com as diferentes formulações de substrato

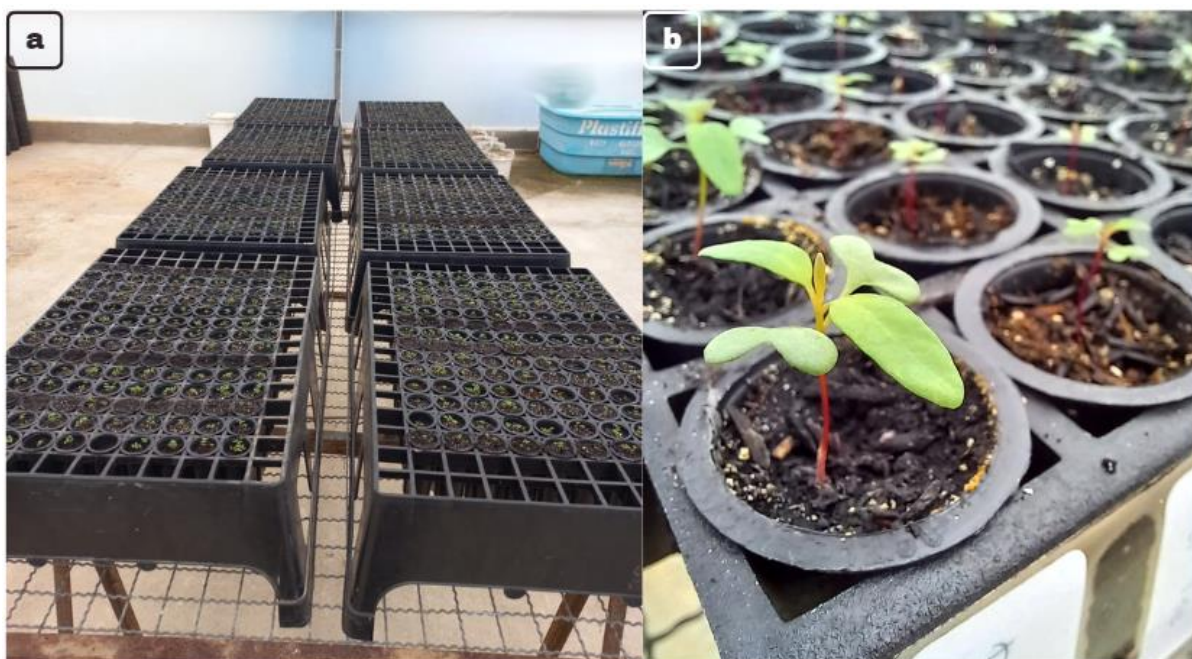


Fonte: Autora, 2024

As sementes foram semeadas nas datas de 14/06/2023 e 28/06/2023 para as formulações de substratos com biochar de LETE aeróbio e anaeróbio, respectivamente. Após 15 dias da semeadura (Figura 17-a), fez-se o desbaste prévio

para manter duas plantas viáveis por célula. Cerca de 30 dias após a semeadura, foi realizado um segundo desbaste definitivo, mantendo-se apenas uma planta viável por tubete (Figura 17-b). O delineamento experimental utilizado foi o de blocos casualizados, com quatro repetições e dez plantas por parcela. Para a análise da performance agrônômica, optou-se pela utilização das seis plantas mais homogêneas de cada tratamento.

Figura 17: Mudanças de eucalipto após 15 e 30 dias da semeadura respectivamente.



Fonte: Autora, 2024

Aos 120 dias após a semeadura, realizou-se a avaliação dos seguintes parâmetros dendométricos das mudas: altura de planta, comprimento do sistema radicular, diâmetro de colo, massa seca da parte aérea e do sistema radicular e índice de qualidade de Dickson. A altura de planta (cm) e o comprimento do sistema radicular (cm) foram medidos nas seis mudas de cada parcela, com régua graduada de precisão milimétrica. O diâmetro do colo foi medido com um paquímetro digital nas seis plantas por parcela. Após esses procedimentos, as mudas foram retiradas dos tubetes e procedeu-se a lavagem cuidadosa do sistema radicular e a separação da parte aérea e raiz, com um corte no início do colo, e após alocadas individualmente em embalagens de papel devidamente identificadas.

A massa seca da parte aérea (g) e do sistema radicular (g) foram determinadas nas seis mudas de cada parcela. Para a obtenção das massas secas em uma balança

analítica de precisão, os tecidos vegetais foram secos em estufa com circulação forçada de ar a $65\pm 1^{\circ}\text{C}$, até atingirem massa constante. O índice de qualidade de Dickson foi obtido através da seguinte equação:

$$IQD = \frac{MST}{\frac{H}{D} + \frac{MSPA}{MSSR}}$$

Sendo: IQD – Índice de Qualidade de Dickson;
 MST – Massa seca total (g);
 H – Altura de planta (cm);
 D – Diâmetro de colo (mm);
 MSPA – Massa seca de parte aérea (g);
 MSSR – Massa seca do sistema radicular (g).

6.2.3 Análise estatística

Os conjuntos de dados brutos obtidos nos experimentos foram avaliados quanto à normalidade de suas distribuições de frequência, e posteriormente submetidos à análise de variância e, em caso de efeitos significativos, foi realizado o teste de comparação estatística de médias pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro, através do software Winstat (Versão 2.0).

6.3 Resultados e Discussão

Os substratos testados proporcionaram efeito significativo sobre as variáveis agronômicas analisadas, onde as proporções de biochar de LETE influenciaram significativamente o desenvolvimento das mudas de eucalipto quando comparadas aos tratamentos testemunhas, ou seja, os substratos comerciais.

Observou-se que, 120 dias após a semeadura, os substratos formulados com biochar de LETE aeróbio apresentaram altura das mudas com amplitude que variou de 3,45 a 22,95 cm, para os tratamentos T1 e T10, respectivamente, para a espécie *Eucalyptus Saligna* (Tabela 6), enquanto que a altura variou de 3,09 a 24,82 cm para os tratamentos T1 e T10, respectivamente, para *Eucalyptus Dunnii* (Tabela 7). Além disso, os resultados obtidos para esta variável mostram que foram estatisticamente melhores os substratos com 80, 90 e 100% de biochar de LETE aeróbio. Sequencialmente, os tratamentos formulados com 50, 60 e 70% de biochar de LETE proporcionaram uma altura de planta igual ou superior aos substratos comerciais.

Wendling *et al.* (2021) recomendaram que as mudas devem apresentar altura da parte aérea de 15 cm a 25 cm para estarem aptas ao plantio. Observa-se, dessa forma que as formulações com no mínimo 50% e 60% foram as que proporcionaram altura de planta de acordo com a literatura para o *E. Dunnii* e *E. Saligna*, respectivamente. Já dentre os substratos comerciais, nenhum atingiu a altura mínima recomendada. Este fato deve estar relacionado, possivelmente, à carência de macro e micronutrientes, essenciais para o pleno desenvolvimento das mudas.

Em relação ao Diâmetro de Colo (DC), observa-se que as proporções com 80, 90 e 100% de biochar de LETE aeróbio foram as que apresentaram maiores valores. Conforme Wendling *et al.* (2021) as mudas de eucalipto devem possuir um valor mínimo de 2,0 mm de DC, dessa forma os tratamentos com 80 a 100% atingiram este valor, porém verifica-se estatisticamente que as formulações com 50% de biochar ou mais proporcionaram DC maior ou igual a melhor substrato comercial.

Tabela 6: Valores médios de altura, Diâmetro de Colo (DC), Massa Seca Total (MST) e Índice de Qualidade de Dickson (IQD) para mudas de *Eucalyptus Saligna* desenvolvidas em substratos a base de biochar de LETE aeróbio

	Tratamento		Altura (cm)	DC (mm)	MST (g)	IQD
	Biochar de LETE (%)	Mistura Base (%)				
T1	0	100	3,45 g	0,29 e	0,0199 g	0,0021 d
T2	10	90	6,57 f	0,45 e	0,0599 g	0,0042 d
T3	20	80	7,88 f	0,54 e	0,0891 fg	0,0058 d
T4	30	70	11,35 e	0,94 d	0,1692 ef	0,0122 cd
T5	40	60	12,58 de	1,42 c	0,3874 d	0,0377 b
T6	50	50	14,03 cd	1,66 bc	0,4971 c	0,0496 b
T7	60	40	16,77 b	1,83 b	0,7016 b	0,0621 a
T8	70	30	14,89 bc	1,50 c	0,4919 cd	0,0427 b
T9	80	20	22,88 a	2,21 a	0,9060 a	0,0711 a
T10	90	10	22,95 a	2,27 a	0,9775 a	0,0743 a
T11	100	0	21,68 a	2,16 a	0,9104 a	0,0717 a
T12	Comercial 1		6,62 f	0,89 d	0,1187 fg	0,0131 cd
T13	Comercial 2		11,65 e	1,14 d	0,2360 e	0,0193 c
T14	Comercial 3		12,72 cde	1,65 bc	0,4059 cd	0,0415 b

Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey ($p > 0,05$).

Fonte: Autora, 2024.

Os tratamentos que resultaram em Massa Seca Total (MST) maior ou igual estatisticamente ao melhor substrato comercial foram os substratos que continham

em sua formulação 50% ou mais de biochar de LETE aeróbio. Dentre os substratos comerciais, o que apresentou melhor desempenho foi o comercial 3.

Quanto ao Índice de Qualidade de Dickson (IQD), os maiores valores foram observados no substrato que continham 60 a 100% e 80 a 100% de biochar para as espécies de *E. Saligna* (Tabela 6) e *E. Dunnii* (Tabela 7), respectivamente. Storck *et al.* (2015) em seus estudos encontraram um IQD de 0,03 para mudas de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* com 120 dias de idade. Os tratamentos com 50% ou mais biochar e o CM3 corroboram com os dados da literatura. Entretanto, os valores de IQD podem sofrer variações entre as próprias espécies de eucalipto, manejo das mudas no viveiro, tipo e proporção do substrato, volume do recipiente e, principalmente, da idade em que a muda será avaliada (Caldeira, 2013). Quanto maior for o IQD melhor será a qualidade da muda, visto que este índice leva em consideração as relações entre os parâmetros morfológicos altura, diâmetro, peso da matéria seca aérea e peso da matéria seca radicular, além da biomassa total. Sendo assim, os tratamentos T9, T10 e T11 (80 a 100% biochar LETE) apresentaram os melhores valores de IQD para o *Eucalyptus Dunnii*, enquanto que os tratamentos de T7 até T11 (40 a 100% biochar LETE) para o *Eucalyptus Saligna*.

Tabela 7: Valores médios de altura, Diâmetro de Colo (DC), Massa Seca Total (MST) e Índice de Qualidade de Dickson (IQD) para mudas de *Eucalyptus Dunnii* desenvolvidas em substratos a base de biochar de LETE aeróbio

	Tratamento		Altura (cm)	DC (mm)	MST (g)	IQD
	Biochar de LETE (%)	Mistura Base (%)				
T1	0	100	3,09 i	0,11 g	0,0111 h	0,0004 f
T2	10	90	7,05 e	0,26 fg	0,0479 gh	0,0018 f
T3	20	80	7,31 e	0,32 f	0,0712 fgh	0,0029 f
T4	30	70	11,55 d	0,60 e	0,1688 ef	0,0080 ef
T5	40	60	13,23 cd	0,94 d	0,2921 d	0,0179 d
T6	50	50	16,97 b	1,37 bc	0,4967 c	0,0339 c
T7	60	40	16,80 b	1,54 b	0,6195 b	0,0465 b
T8	70	30	17,69 b	1,46 bc	0,5056 c	0,0349 c
T9	80	20	24,46 a	1,73 a	1,0317 a	0,0619 a
T10	90	10	24,82 a	1,87 a	1,0400 a	0,0640 a
T11	100	0	23,43 a	1,84 a	1,0685 a	0,0674 a
T12	Comercial 1		6,60 e	0,52 c	0,1215 fg	0,0082 ef
T13	Comercial 2		11,48 d	0,94 e	0,2273 de	0,0156 de
T14	Comercial 3		13,57 c	1,33 c	0,4781 c	0,0367 c

Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey ($p > 0,05$).

Fonte: Autora, 2024.

Em relação aos substratos formulados com biochar de LETE anaeróbio, estes apresentaram altura das mudas com amplitude que variou de 3,45 a 22,62 cm, para os tratamentos T1 e T9, respectivamente, para a espécie *Eucalyptus Saligna* (Tabela 8), enquanto que a altura variou de 2,60 a 25,47 cm para os tratamentos T1 e T9, respectivamente, para *Eucalyptus Dunnii* (Tabela 9).

Analisando as duas espécies de eucalipto utilizadas no presente estudo, constatou-se que os substratos contendo 70 e 80% de biochar de LETE anaeróbio foram os que apresentaram as melhores alturas de plantas para as espécies de *E. Saligna* e *E. Dunnii*. Enquanto aqueles com 50% ou mais demonstraram desempenho similar ao substrato comercial de melhor desempenho.

Os tratamentos que continham 50% ou mais de biochar LETE anaeróbio apresentaram tanto DC quanto MST igual ou superior ao melhor substrato comercial, evidenciando assim que os substratos formulados com LETE anaeróbio, dependendo da formulação, apresentaram desempenho igual ou superior aos comerciais.

Tabela 8: Valores médios de altura, Diâmetro de Colo (DC), Massa Seca Total (MST) e Índice de Qualidade de Dickson (IQD) para mudas de *Eucalyptus saligna* desenvolvidas em substratos a base de biochar de LETE anaeróbio

	Tratamento		Altura (cm)	DC (mm)	MST (g)	IQD
	Biochar de LETE (%)	Mistura Base (%)				
T1	0	100	3,45 h	0,13 j	0,0112 i	0,0004 g
T2	10	90	5,04 gh	0,25 ij	0,0371 hi	0,0018 g
T3	20	80	5,54 fgh	0,35 ij	0,0608 ghi	0,0037 fg
T4	30	70	7,65 ef	0,41 hi	0,1003 ghi	0,0051 fg
T5	40	60	9,73 de	0,70 fg	0,1632 fg	0,0107 efg
T6	50	50	11,45 d	1,34 d	0,3994 d	0,0385 d
T7	60	40	14,75 c	1,71 c	0,5689 c	0,0529 c
T8	70	30	22,33 a	2,57 a	1,0910 a	0,0956 a
T9	80	20	22,62 a	2,53 a	1,0876 a	0,0794 b
T10	90	10	19,44 b	2,26 b	0,9643 b	0,0866 ab
T11	100	0	9,89 d	0,88 ef	0,2469 ef	0,0203 e
T12	Comercial 1		6,80 fg	0,61 gh	0,1295 gh	0,0103 efg
T13	Comercial 2		10,59 d	0,88 ef	0,2437 ef	0,0173 ef
T14	Comercial 3		10,33 d	1,02 e	0,2773 e	0,0227 e

Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey ($p > 0,05$).

Fonte: Autora, 2024.

Quanto ao IQD, observa-se que os tratamentos contendo 50% ou mais de biochar de LETE anaeróbio apresentaram valores médios iguais aos comerciais. Kratz e Wendling (2013) encontraram valores de IQD de aproximadamente 0,02 para mudas de *Eucalyptus dunnii* aos 90 dias após a semeadura.

Tabela 9: Valores médios de altura, Diâmetro de Colo (DC), Massa Seca Total (MST) e Índice de Qualidade de Dickson (IQD) para mudas de *Eucalyptus Dunnii* desenvolvidas em substratos a base de biochar de LETE anaeróbio

	Tratamento		Altura (cm)	DC (mm)	MST (g)	IQD
	Biochar de LETE (%)	Mistura Base (%)				
T1	0	100	2,60 i	0,06 h	0,01 j	0,0002 g
T2	10	90	4,95 h	0,15 h	0,03 ij	0,0008 g
T3	20	80	6,72 gh	0,21 h	0,05 hij	0,0015 g
T4	30	70	9,71 f	0,44 g	0,11 ghi	0,0046 g
T5	40	60	10,66 ef	0,55 g	0,15 fg	0,0075 g
T6	50	50	15,29 c	1,29 d	0,42 d	0,0301 fg
T7	60	40	21,27 b	1,70 c	0,66 c	0,0462 d
T8	70	30	24,29 a	2,20 a	1,08 a	0,0814 a
T9	80	20	25,47 a	2,25 a	1,13 a	0,0782 a
T10	90	10	21,97 b	1,95 b	0,87 b	0,0622 b
T11	100	0	12,53 de	1,03 e	0,21 ef	0,0154 ef
T12	Comercial 1		7,47 g	0,52 g	0,13 fgh	0,0081 fg
T13	Comercial 2		12,93 d	0,80 f	0,28 e	0,0152 ef
T14	Comercial 3		11,80 de	0,99 ef	0,30 e	0,0213 de

Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey ($p > 0,05$).

Fonte: Autora, 2024.

Além disso, Wendling *et al.* (2021) afirmam que as mudas de eucalipto, para estarem aptas ao plantio, o sistema radicular deve ocupar todo o volume interno do tubete, além destas apresentar coloração branca (raízes novas). Na Figura 18 pode-se observar o desenvolvimento do sistema radicular das mudas de eucalipto, onde se verifica que, dentre os substratos formulados com biochar, as mudas representadas pelos tratamentos T5 até T9 apresentaram torrões mais uniformes, após serem retiradas dos tubetes. Enquanto isso, os tratamentos T10 e T11 demonstraram maior resistência à retirada dos tubetes, além de apresentarem menos raízes visíveis ao redor do torrão. Este comportamento deve-se provavelmente ao fato destes tratamentos apresentarem as maiores densidades úmidas e secas, aumentando o atrito com as paredes dos tubetes e, conseqüentemente, dificultando sua retirada.

Dessa forma, esse comportamento contrasta com os melhores resultados de performance agrônômica destes tratamentos, sugerindo a necessidade de desenvolver alguma tecnologia que reduza o atrito do substrato + raízes com as paredes dos tubetes.

Figura 18: Mudanças de eucalipto produzidas com as diferentes formulações de biochar de LETE



Fonte: Autora, 2024.

6.5 Conclusões

As formulações que continham 50% ou mais de biochar de LETE aeróbio e anaeróbio foram aquelas que proporcionaram alturas de muda, Diâmetro de Colo, Massa Seca Total e Índice de Qualidade de Dickson equivalentes ou superiores aos substratos comerciais.

Os tratamentos com 50% a 80% foram os que apresentaram torrões mais uniformes e concisos, após serem retiradas dos tubetes.

O uso combinado de biochar LETE anaeróbio e aeróbio juntamente com uma Mistura Base, demonstrou ser eficiente na formulação do substrato para o cultivo de mudas de *Eucalyptus dunnii* e *saligna*.

Considerações Finais

O biochar de LETE, tanto anaeróbio quanto aeróbio, demonstrou ser uma matéria-prima altamente eficiente na composição de substratos para mudas, oferecendo características nutricionais adequadas para o desenvolvimento satisfatório das plantas.

Os substratos contendo biochar de LETE, tanto anaeróbio quanto aeróbio, revelaram maiores quantidades de macro e micronutrientes extraíveis em comparação com os substratos comerciais. Isso contribui para uma maior eficiência agrônômica e um crescimento e desenvolvimento satisfatório das plantas.

Além disso, o biochar de LETE, seja anaeróbio ou aeróbio, é considerado um material ambientalmente seguro e agronomicamente eficiente para o cultivo em substratos. O processo de pirólise utilizado na sua produção elimina contaminantes patogênicos, proporcionando assim um material propício para o crescimento saudável das plantas.

Referências

AGRAFIOTI, E.; BOURAS, G.; KALDERIS, D.; DIAMADOPOULOS, E. Biochar production by sewage sludge pyrolysis. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**. v.101, p.72-78, 2013.

ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte. v.6. Curitiba: 2001. 484p.

ARAUJO, A. S. de. **Biochar de lodo de esgoto e *Trichoderma afroharzianum* no controle de fungos fitopatogênicos**. 2022. Tese (Doutorado em Agronomia) - Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, 2022.

ARAUJO, D. D. de. **Efeito do biochar de lodo de esgoto no crescimento inicial de mudas de *Erythrina velutina willd.*** 2016. 79f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

BATISTA, L. F. **Lodos gerados nas estações de tratamento de esgotos no Distrito Federal: um estudo de sua aptidão para o condicionamento, utilização e disposição final**. 2015. 197f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

BETTIOL, W.; DE CAMARGO, O. A. A disposição de lodo de esgoto em solo agrícola. In: **Lodo de Esgoto: Impactos Ambientais da Agricultura**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2006. cap 2, p.25-35

BITENCOURT, G. A.; DEKNES, L. B.; LAURA, V. A. Crescimento de mudas de eucalipto em solo com aplicação do lodo de curtume. **Scientia Plena**, v. 18, n. 3, 2022.

BRASIL. Instrução normativa MAPA nº 17, de 17 de maio de 2007. Métodos analíticos oficiais para análise de substratos para plantas e condicionadores de solo. Brasília: **Diário Oficial da União**, 24 mai. 2007.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Plano Nacional de Resíduos**. Brasília: MMA, p. 209, 2022.

BRASIL. Resolução CONAMA nº 498, de 19 de agosto de 2020. Define critérios e procedimentos para produção e aplicação de biossólido em solos, e dá outras providências. Brasília: **Diário Oficial da União**, 21 ago. 2020, n. 161, Seção 1, p. 265-269.

CALDEIRA, M. V. *et al.* Lodo de esgoto e vermiculita na produção de mudas de eucalipto. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 43, p. 155-163, 2013.

CALDEIRA, M. V. W. *et al.* Biossólido na composição de substrato para a produção de mudas de *Tectona grandis*. **Floresta**, Curitiba, v. 42, n. 1, p. 77 - 84, 2012.

CARVALHO, L. C. C. S. **Aproveitamento de Lodo de Esgoto Urbano como substrato para a produção de cedro Australiano (*Toona Ciliata*)**. 2018.

Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental) – Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda, Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, 2018.

CUNHA, A. M. *et al.* Efeito de diferentes substratos sobre o desenvolvimento de mudas de Acacia sp. **Revista árvore**, v. 30, p. 207-214, 2006.

DE BOODT, M.; VERDONCK, O. The physical properties of the substrates in: Floriculture. **Acta Horticulturae**, Leuven, v. 26, n. 1, p. 37-44, 1972.

DIAS, D. D. *et al.* O uso de diferentes doses de lodo de esgoto como fonte de fertilizante para a cultura da alface (*lactuca sativa* L.). **Horticultura Brasileira**, v.29, n.2, 2011.

EMBRAPA. **O Eucalipto**. 2019. Disponível em:

<https://www.embrapa.br/florestas/transferencia-de-tecnologia/eucalipto>>. Acesso em: 07 set. 2022.

FARIA, J. C. T. *et al.* O. Substratos à base de lodo de esgoto na produção de mudas de Senna alata. **Comunicata Scientiae**, Bom Jesus, v.4, n.4, p.342-351, 2013.

FERMINO, M. H. **Substratos: composição, caracterização e métodos de análise**. Guaíba: Agrolivros, 2014. 112p. il.

FERMINO, M. H.; KÄMPF, A. N. Densidade de substratos dependendo dos métodos de análise e níveis de umidade. **Horticultura Brasileira**, v. 30, p. 75-79, 2012.

FERREIRA, D.; MORAIS, S. Nutrição do eucalipto: Manual de apoio à gestão nutricional. 2021. Disponível em: <https://www.e-globulus.pt/api/v1/c2/file/04d7994c-3e8b-456b-84ad-4448db11f127>. Acesso em: 23 jan. 2024.

FRIŠTÁK, V.; PIPÍŠKA, M.; SOJA, G. Pyrolysis treatment of sewage sludge: A promising way to produce phosphorus fertilizer. **Journal of Cleaner Production**, v. 172, p. 1772-1778, 2018.

GONÇALVES, L. M.; POGGIANI, F. Substratos para produção de mudas florestais. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE CIÊNCIA DO SOLO, 13. Águas de Lindoia, 1996. **Anais...** Piracicaba, Sociedade Latino-Americana de Ciência do Solo, 1996. CD-ROM

GONÇALVES, J. L. M.; SANTERELLI, E. G.; NETO, S. P. M.; MANARA, M. P. Produção de mudas de espécies nativas: substrato, nutrição, sombreamento e

fertilização. In: GONÇALVES, J. L. M.; BENEDETTI, V. (Eds.). *Nutrição e fertilização florestal*. Piracicaba: IPEF, p. 309-350, 2000.

GONZAGA, M. I. S. *et al.* Biocarvão de lodo de esgoto e seu efeito no crescimento e nas características morfológicas de mudas de eucalipto (*Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden). **Ciência Florestal**, v. 28, p. 687-695, 2018.

HWANG, I. H.; OUCHI, Y.; MATSUTO, T. Characteristics of leachate from pyrolysis residue of sewage sludge. **Chemosphere**, v. 68, n. 10, p. 1913-1919, 2007.

IBÁ. Indústria Brasileira de Árvores: **Relatório Anual**. 2020. Disponível em: <<https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-iba-2020.pdf>>. Acesso em: 07 set. 2022.

IBÁ. Indústria Brasileira de Árvores: **Relatório Anual**. 2023. Disponível em: <<https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2023-r.pdf>>. Acesso em: 03 fev. 2024.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Demográfico 2022**. Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: <https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/>. Acesso em: 03 fev. 2024.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa nacional de saneamento básico 2017: abastecimento de água e esgotamento sanitário**. 2020. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101734.pdf>. Acesso em: 29 ago. 2022.

Jamovi project (2023). *jamovi*. (Version 2.4) [Computer Software]. Retrieved from <https://www.jamovi.org>.

JORDÃO, E. P.; PESSOA, C. A. **Tratamento de Esgotos Domésticos**. 4. ed. Rio de Janeiro: 2005.

JORGE, M. H. A. *et al.* **Informações técnicas sobre substratos utilizados na produção de mudas de hortaliças**. Brasília, DF: Embrapa Hortaliças. 2020. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1125796/1/DOC-180-18-set-2020.pdf> . Acesso em: 05 set. 2022.

KEHERWALD, G. U. **Biochar de lodo de esgoto como fonte de fósforo para o milho: uma abordagem inicial**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Agrônômica) - Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, Brasília, 2021. Monografia (Graduação – Agronomia) – Universidade de Brasília, 2021.

KRATZ, D.; WENDLING, I. Produção de mudas de *Eucalyptus dunnii* em substratos renováveis. **Floresta**, v. 43, n. 1, p. 125-136, 2013.

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. (Ed.). **Biochar for environmental management: science, technology and implementation**. Routledge, 2015.

MARTINI, A. J. **A Introdução do Eucalipto no Brasil Completa 100 Anos**. 2010. Disponível em: <https://tudosobreplantas.wordpress.com/2010/10/25/a-introducao-do-eucalipto-no-brasil-completa-100-anos/>. Acesso em: 24 jan 2024.

MATOS; E. J. S. de. **Avaliação do uso do biocarvão de Lodo de Esgoto no desenvolvimento de mudas de *Corymbia Citriodora***. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenheiro Florestal) - Departamento de Ciências Florestais, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2020.

MONTEIRO, A. B. *et al.* Agronomic performance and optimal ranges of attributes of substrates with biochar from anaerobic sewage sludge for black wattle (*Acacia mearnsii*) seedlings. 2021.

MONTEIRO, A. B. *et al.* Efficient substrates based on anaerobic sewage sludge biochar for tobacco seedlings in floating systems. **Archives of Agronomy and Soil Science**, p. 1-16, 2022.

MONTEIRO, A. B. *et al.* Agronomic performance and optimal ranges of attributes of substrates with biochar from anaerobic sewage sludge for black wattle (*Acacia mearnsii*) seedlings. 2021.

MONTEIRO, A. B. *et al.* Substratos a base de lodo de esgoto solarizado e pirolizado para produção de mudas de alface. **Revista da Jornada de Pós-Graduação e Pesquisa-Congrega Urcamp**, p. 2571-2583, 2017.

MONTEIRO, A. B. **Desenvolvimento e avaliação agrônômica de substratos formulados a partir de biochar de lodo de esgoto**. 2019. 101 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Programa de Pós-graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Capão do Leão, Brasil, 2019.

NASCIMENTO, A. L. *et al.* Atributos químicos do solo adubado com lodo de esgoto estabilizado por diferentes processos e cultivado com girassol. **Bioscience Journal**, v. 30, n. 1, p. 146-153, 2014.

NASCIMENTO, P. A. **Espécies de eucalipto mais plantadas no Brasil**. 2022. Disponível em: <https://revistacampoenegocios.com.br/especies-de-eucalipto-mais-plantadas-no-brasil/>. Acesso em: 07 set. 2022.

ONU. Organização das Nações Unidas. Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil. 2024. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>>. Acesso em: 26 mar 2024.

ONU. United Nations Organization. World Population Prospects 2022: Summary of Results. New York: 2022. Disponível em: <https://www.un.org/development/desa/pd/sites/www.un.org.development.desa.pd/files/wpp2022_summary_of_results.pdf>. Acesso em: 11 out. 2022.

Paula Jr, Durval R. De, Vera C. R. Padovani, and Alexandro B. Ricci. Forest seedlings production using stabilized sewage sludge. **Revista Brasileira De Engenharia De Biosistemas**, v.3 n.3, p.269-276, 2009.

PAULA, A. M. de; SOARES, C.; SIQUEIRA, J. O. Biomassa, atividade microbiana e fungos micorrízicos em solo de "landfarming" de resíduos petroquímicos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, p. 448-455, 2006.

PINTO, P. A. C. **Sedimentos orgânicos utilizados como fertilizantes na agricultura**. Bahia: 2003.

REISSER JUNIOR, C.; MEDEIROS, C. A. B.; RADIN, B.. **Produção de mudas em estufas plásticas**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2008.

REN, N.; TANG, Y.; LI, M. Mineral additive enhanced carbon retention and stabilization in sewage sludge-derived biochar. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 115, p. 70-78, 2018.

RIZWAN, M. *et al.* Mechanisms of biochar-mediated alleviation of toxicity of trace elements in plants: a critical review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 23, n. 3, p. 2230-2248, 2016.

RODRIGUES, L. A. **Produção de mudas de *Salvia splendens* e *Pachyveria glauca* em substratos de biocarvão de lodo de esgoto e casca de arroz**. 2017. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Minas Gerais, Montes Claros, 2017.

SANTOS, F. E. V *et al.* Características químicas de substratos formulados com lodo de esgoto para produção de mudas florestais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, p. 971-979, 2014.

SILVA, M. I. *et al.* Potential impacts of using sewage sludge biochar on the growth of plant forest seedlings. **Ciência Rural**, v. 47, n. 1, 2017.

SILVA, M. T. **Substratos a base de lodo de esgoto para produção de mudas de cana-de-açúcar**. 2018. Tese (Doutorado em Agronomia) - Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2018.

- SOUSA, A. A. T. C. **Biochar de lodo de esgoto: efeitos no solo e na planta no cultivo de rabanete.** 2015. 63f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2015.
- STORCK, E. B.; SCHORN, L. A.; FENILLI, T. A. B. Crescimento e qualidade de mudas de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* em diferentes recipientes. **Floresta**, v. 46, n. 1, p. 39-46, 2016.
- VENCE, L. B. Disponibilidad de agua-aire en sustratos para plantas. **Ciencia del suelo**, v. 26, n. 2, p. 105-114, 2008.
- VERDONCK, O. Barck compost a new accepted growing medium for plants. **Acta Horticulturae.**, Wageningen, v. 133, p. 221-227, 1983.
- VESILIND, P. A.; RAMSEY, T. B. Effect of drying temperature on the fuel value of wastewater sludge. **Waste management & research**, v. 14, n. 2, p. 189-196, 1996.
- WENDLING, I.; DUTRA, L. F.; MORENO, M.; VIEIRA, G. L. M.; DEGENHARDT, Juliana. Produção de mudas de eucalipto. In OLIVEIRA, Edilson Batista de; JUNIOR, José Elidney Pinto (Eds.). **O eucalipto e a Embrapa: quatro décadas de pesquisa e desenvolvimento**, 2021. p.823-858, 2021.
- YUAN, H. *et al.* Sewage sludge biochar: Nutrient composition and its effect on the leaching of soil nutrients. **Geoderma**, v.267, p.17-23, 2016.
- YUE, Yan *et al.* Efficiency of sewage sludge biochar in improving urban soil properties and promoting grass growth. **Chemosphere**, v. 173, p. 551-556, 2017.