

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA- UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS AGROVETERINÁRIAS- CAV
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO- PPGCS

RENATA NETO DUARTE

**APLICAÇÃO DE BIOSSÓLIDO DA INDÚSTRIA DE PAPEL E CINZA DE
TERMOELÉTRICA NA PRODUÇÃO DE MUDAS DE *Eucalyptus grandis***

LAGES

2025

RENATA NETO DUARTE

**APLICAÇÃO DE BIOSSÓLIDO DA INDÚSTRIA DE PAPEL E CINZA DE
TERMOELÉTRICA NA PRODUÇÃO DE MUDAS DE *Eucalyptus grandis***

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciência do Solo.

Orientadora: Dr^a Mari Lucia Campos

Coorientadores: Dr^o Osmar Klauberg Filho

LAGES

2025

**Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da
Biblioteca Universitária Udesc,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

Neto Duarte, Renata
APLICAÇÃO DE BIOSSÓLIDO DA INDÚSTRIA DE PAPEL
E CINZA DE TERMOELÉTRICA NA PRODUÇÃO DE MUDAS
DE Eucalyptus grandis / Renata Neto Duarte. -- 2025.
102 p.

Orientadora: Mari Lucia Campos
Coorientador: Osmar Klauberg Filho
Dissertação (mestrado) -- Universidade do Estado de Santa
Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de
Pós-Graduação em Ciência do Solo, Lages, 2025.

1. biossólido. 2. cinzas de biomassa. 3. sustrato. 4. Eucalyptus
granis. 5. ecotoxicologia. I. Campos, Mari Lucia . II. Klauberg
Filho, Osmar. III. Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro
de Ciências Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em
Ciência do Solo. IV. Título.

RENATA NETO DUARTE

**APLICAÇÃO DE BIOSSÓLIDO DA INDÚSTRIA DE PAPEL E CINZA DE
TERMOELÉTRICA NA PRODUÇÃO DE MUDAS DE *Eucalyptus grandis***

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciência do Solo.

Orientadora: Dr^a Mari Lucia Campos

Coorientadores: Dr^o Osmar Klauberg Filho

Orientadora:

Dr^a Mari Lucia Campos
Universidade do Estado de Santa Catarina

Membros:

Dr^o Marcio Carlos Navroski
Universidade do Estado de Santa Catarina

Dr^a Daniela Tomazelli
Universidade do Estado de Santa Catarina

Dr^a Mireli Moura Pitz Floriani
Membro externo- Klabin S. A., Lages, SC

Lages, 19 de fevereiro de 2025

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à minha família, especialmente minha mãe, avó e avô (In memorian). Quem sou e onde estou, devo grandemente a eles.

Agradeço à minha orientadora Mari Lúcia Campos por me dar esta oportunidade e me guiar neste caminho, sendo não só um grande exemplo de profissional, mas também de ser humano. E aos demais professores e colegas que de uma forma ou outra contribuíram em minha jornada.

Agradeço aos amigos do Laboratório de Levantamento e Análise Ambiental (LLAA), em especial a Natacha, Elias, Betel, Beatriz, Carol e aos demais, por me tornarem parte deste grupo. E ao pessoal do Laboratório de Ecologia e Ecotoxicologia Terrestre, especialmente, Rafaela, Douglas, Daniela e Thiago. Gostaria que soubessem o quanto os admiro.

Devo um agradecimento especial a Betel e Douglas por atuarem como meus revisores. E a Natacha e Elias pelas grandes pessoas e amigos que são. As lembranças que compartilhamos dificilmente serão esquecidas.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo e a Universidade do Estado de Santa Catarina pelo ensino de qualidade e toda a estrutura fornecida para a execução deste projeto e a CAPES e ao PAP/FAPESC (FAPESC 2023 TR733) pelo auxílio financeiro. E aos demais envolvidos neste projeto.

Agradeço à todas as pessoas que de uma forma ou outra fizeram parte, mesmo que momentaneamente, de minha vida. Cada encontro no caminho deixa uma marca em nossa alma e nos faz quem somos. Agradeço a todos que me auxiliaram ou incentivaram não só neste momento, mas em toda a vida. E agradeço à minha irmã por compartilhar a estrada comigo (gostaria de ser como você um dia).

Por fim, agradeço ao desconhecido e ao destino que tecem as teias e preparam os caminhos tornando tudo isso possível e nos concedendo a oportunidade de escolher o caminho a ser trilhado.

Enfim, muito obrigada!

*[...] be a simple kind of man
Be something you love and understand
Be a simple kind of man...*

(Simple man, Lynyrd Skynyrd)

RESUMO

A geração de resíduos industriais representa um desafio, tanto ambiental quanto econômico, devido ao elevado volume produzido e ao descarte inadequado. No setor papeleiro e energéticos, bioassólidos e cinzas de biomassa são dois subprodutos com significativo potencial de reaproveitamento. Os bioassólidos, originados do tratamento de efluentes industriais são ricos em matéria orgânica e nutrientes, enquanto as cinzas de termoelétrica, contribuem para a elevação do pH. No entanto, devido à natureza destes materiais e a possibilidade de contaminação por elementos traço, é essencial avaliar sua toxicidade e determinar doses seguras para uso. Este estudo tem como objetivo avaliar o potencial de uso do bioassólido proveniente da indústria de papel e celulose como componente de substrato, em associação com cinzas de origem vegetal, para a produção de mudas de *Eucalyptus grandis*. O trabalho está dividido em dois estudos: (1) Utilização de bioassólido da indústria papeleira e cinzas de termoelétrica na produção de mudas de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. Para isso, foram formulados substratos utilizando uma mistura base composta por cascas de *Pinus* compostadas e casca de arroz carbonizada (1:1, v/v), enriquecida com 15% de cinzas, e diferentes proporções de bioassólido (0, 5, 10, 15 e 30%). A espécie *Eucalyptus grandis* foi selecionada devido a importância da mesma para indústria papeleira brasileira de modo a fomentar a economia circular. Foram avaliadas as características físicas e químicas do substrato, os parâmetros morfológicos das mudas e os índices de qualidade das mudas; (2) Avaliação ecotoxicológica do uso de bioassólido da indústria de papel e cinzas de termoelétrica na composição de substratos. Neste estudo, foram utilizados os mesmos tratamentos do estudo 1, e as avaliações consistiram em testes de reprodução com organismos edáficos (*Folsomia candida* e *Enchytraeus albidus*), além de testes de germinação e desenvolvimento vegetal (*Avena sativa* e *Lactuca sativa*). A caracterização física e química dos substratos indicou que o incremento de bioassólido melhorou a retenção de água e a disponibilidade de nutrientes, enquanto as cinzas contribuíram para a correção da acidez. A avaliação das mudas de *E. grandis*, realizada por meio de parâmetros morfológicos, ressaltou o efeito positivo do bioassólido e das cinzas no desenvolvimento de mudas florestais. Os ensaios ecotoxicológicos com organismos edáficos e vegetais demonstraram que doses mais altas de bioassólido podem ser prejudiciais ao ambiente, destacando a necessidade de equilíbrio entre eficiência produtiva e segurança ambiental. Os resultados apontam que substratos com até 15% de bioassólido proporcionaram o melhor

desempenho no crescimento das mudas, mantendo baixos impactos ambientais. Este estudo reforça a viabilidade de reutilizar resíduos ambientais na produção florestal, promovendo a sustentabilidade e a economia circular no setor, e contribui para estratégias de manejo sustentável.

Palavras-chave: Biossólido, cinzas de biomassa, substrato, *Eucalyptus grandis*, ecotoxicologia

ABSTRACT

The generation of industrial waste represents both an environmental and economic challenge due to the high volume produced and improper disposal. In the paper and energy sectors, biosolids and biomass ash are two by-products with significant reuse potential. Biosolids, derived from the treatment of industrial effluents are rich in organic matter and nutrients, while thermoelectric ash contributes to pH elevation. However, due to the nature of these materials and the possibility of contamination by trace elements, it is essential to assess their toxicity and determine safe application rates. This study aims to evaluate the potential use of biosolids from the pulp and paper industry as a substrate component, in association with plant-based ash, to produce *Eucalyptus grandis* seedlings. The research is divided into two studies: 1) Use of biosolids from the paper industry and thermoelectric ash in the production of *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden seedlings. To this end, substrates were formulated using a base mixture composed of composted *Pinus* bark and carbonized rice husk (1:1, v/v), enriched with 15% ash, and different proportions of biosolids (0, 5, 10, 15 e 30%). *Eucalyptus grandis* was selected due to its importance to the Brazilian paper industry, aiming to foster a circular economy. The study assessed the physical and chemical characteristics of the substrate, the morphological parameters of the seedling, and their quality indices. 2) Ecotoxicological evaluation of the use of biosolids from the paper industry and thermoelectric ash in substrate composition. This study used the same treatments as Study 1, with evaluations consisting of reproduction tests with soil organisms (*Folsomia candida* and *Enchytraeus albidus*), as well as germination and plant development tests (*Avena sativa* and *Lactuca sativa*). The physical and chemical characterization of the substrates indicated that the addition of biosolids improved water retention and nutrient availability, while ash contributed to acidity correction. The evaluation of *E. grandis* seedlings, based on morphological parameters, highlighted the positive effect of biosolids and ash on seedling development. The ecotoxicological tests with soil organisms and plants demonstrated that higher doses of biosolids could be harmful to the environment, emphasizing the need to balance productive efficiency and environmental safety. The results indicate that substrates containing up 15% biosolids provided the best seedling growth performance while maintaining low environmental impact. This study reinforces the feasibility of reusing industrial waste in forest production, promoting sustainability and circular economy in the sector, and contributing to sustainable management strategies.

Keywords: Biosolids, biomass ash, substrate, *Eucalyptus grandis*, ecotoxicology.

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1- Teor de elementos inorgânicos no biossólido e porcentagem de recuperação dos elementos obtida para amostra certificada NIST 2709 A..... | 38 |
| Tabela 2- Teor de elementos inorgânicos nas cinzas e porcentagem de recuperação dos elementos obtida para amostra certificada NIST 2709 A..... | 39 |
| Tabela 3- Composição dos substratos com doses crescentes de biossólido utilizados no estudo..... | 41 |
| Tabela 4- Propriedades físicas porosidade total (PT) espaço de aeração (EA), água disponível (AD), água facilmente disponível (AFD), água tamponante (AT), água remanescente (AR), e densidade seca (DS) dos substratos tratados com doses crescentes de biossólido..... | 46 |
| Tabela 5- Propriedades químicas: condutividade elétrica (CE) e pH dos substratos com doses crescentes de biossólido..... | 51 |
| Tabela 6- Teor de Carbono orgânico total (COT), Nitrogênio total (N) e fósforo total (P) dos substratos com doses crescentes de biossólido..... | 53 |
| Tabela 7- Teor de elementos inorgânicos presentes nos substratos com doses crescentes de biossólido..... | 55 |
| Tabela 8- Teor de elementos traço nos substratos com doses crescentes de biossólido e concentrações máximas permitidas pela CONAMA 498/2020..... | 58 |
| Tabela 9- Avaliação da germinação e sobrevivência das mudas de <i>E. grandis</i> obtidas em substratos com doses crescentes de biossólido..... | 60 |
| Tabela 10- Parâmetros morfológicos estruturais altura e diâmetro à altura do coleto (DC) das mudas de <i>E. grandis</i> obtidas em substratos com doses crescentes de biossólido..... | 62 |
| Tabela 11- Avaliação da biomassa das mudas das <i>E. grandis</i> obtidas em substratos com doses crescentes de biossólido..... | 63 |

| | |
|--|----|
| Tabela 12- Atributos radiculares comprimento de raiz (CR), diâmetro de raiz (DR), área de projeção de raízes (APS), área superficial de raízes (ASR) e volume ocupado pelas raízes (VR) das mudas de <i>E. grandis</i> obtidas em substratos com doses crescentes bioassólido..... | 65 |
| Tabela 13- - Índices de qualidade para as mudas de <i>E. grandis</i> obtidas em substratos com doses crescentes de bioassólido- Relação altura diâmetro a altura do coleto (RHDC), Relação altura massa seca da parte aérea (RHMSPA) e índice de qualidade de Dickson (IQD)..... | 68 |
| Tabela 14- - Composição dos substratos com doses crescentes de bioassólido para ensaio ecotoxicológico..... | 83 |
| Tabela 15- Propriedades físicas e químicas dos substratos com doses crescentes de bioassólido utilizados para avaliação ecotoxicológica..... | 84 |
| Tabela 16- Concentração de elementos traço nos substratos com doses crescentes de bioassólido..... | 84 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1- Estrutura utilizada para combustão de biomassa e geração de energia..... | 39 |
| Figura 2- Proporção de componentes dos substratos com doses crescentes de biossólido em porcentagem- Sólidos, EA, AFD, AT e AR..... | 50 |
| Figura 3- Mudas de <i>Eucalyptus grandis</i> desenvolvidas em substratos com doses crescentes de biossólido..... | 62 |
| Figura 4- Imagens das raízes de <i>E. grandis</i> desenvolvidas em substratos com doses crescentes de biossólido obtidas pelo programa WhinRhizo..... | 66 |
| Figura 5- A Avaliação dos ensaios de reprodução com <i>F. candida</i> em substratos com doses crescentes de biossólido..... | 88 |
| Figura 6- A Avaliação dos ensaios de reprodução com <i>E. albidus</i> em substratos com doses crescentes de biossólido..... | 89 |
| Figura 7- Avaliação da germinação de <i>L. sativa</i> em substratos com doses crescentes de biossólido..... | 92 |
| Figura 8- Avaliação da germinação de <i>A. sativa</i> e <i>L. sativa</i> em substratos com doses crescentes..... | 92 |
| Figura 9– Avaliação da biomassa (g) de <i>Avena sativa</i> desenvolvida em substratos com doses crescentes de biossólido..... | 93 |
| Figura 10– Avaliação da biomassa (g) de <i>Lactuca sativa</i> desenvolvida em substratos com doses crescentes de biossólido..... | 94 |
| Figura 11- Avaliações de altura e número de folhas de <i>A. sativa</i> e número de folhas de <i>L. sativa</i> desenvolvidas em substratos com doses crescentes de biossólido..... | 94 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|-----------------|---------------------------------------|
| AD | Água disponível |
| AFD | Água facilmente disponível |
| APR | área de projeção da raiz |
| AR | Água remanescente |
| ASR | Área superficial de raízes |
| AT | Água tamponante |
| CE | Condutividade elétrica |
| CE _x | Concentração de efeito |
| CENO | Concentração de efeito não observado |
| C/N | Relação carbono/nitrogênio |
| CEO | Concentração de efeito observado |
| COT | Carbono orgânico total |
| CR | Comprimento de raiz |
| CRA | Capacidade de retenção de água |
| CV | Coeficiente de variação |
| DC | Diâmetro do coleto |
| DIC | Delineamento inteiramente causalizado |
| DIE | Dias até iniciar a emergência |
| DR | Diâmetro de raiz |
| Ds | Densidade seca |
| EA | Espaço de aeração |
| ETE | Estação de tratamento de efluentes |

| | |
|--------|--|
| H | Altura |
| IN | Instrução normativa |
| IQD | Índice de qualidade de Dickson |
| ISO | International Organization for Standardization |
| MFPA | Massa fresca da parte aérea |
| MFR | Massa fresca de raiz |
| MSPA | Massa seca da parte aérea |
| MSR | Massa seca de raiz |
| MS | Mudas sobreviventes |
| N° | Número |
| pH | Potencial hidrogeniônico |
| PT | Porosidade total |
| RHDC | Relação altura/diâmetro do coleto |
| RHMSPA | Relação altura/massa seca da parte aérea |
| SM/NG | Sementes mortas ou não germinadas |
| VR | Volume de raiz |

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| CAPÍTULO 1- CONTEXTUALIZAÇÃO..... | 15 |
| 1.1. INTRODUÇÃO GERAL..... | 15 |
| 1.2. OBJETIVO..... | 17 |
| 1.2.1. Objetivos específicos..... | 18 |
| 1.3. HIPÓTESES..... | 18 |
| 1.4. REFERENCIAL TEÓRICO..... | 19 |
| 1.4.1. Substratos alternativos na produção de mudas florestais..... | 19 |
| 1.4.1.1. Biossólido..... | 20 |
| 1.4.1.2. Cinzas..... | 21 |
| 1.4.2. <i>Eucalyptus grandis</i>..... | 22 |
| 1.4.3. Ecotoxicologia..... | 23 |
| 1.5. REFERÊNCIAS..... | 25 |
| CAPÍTULO 2- UTILIZAÇÃO DE BIOSSÓLIDO DA INDÚSTRIA PAPELEIRA E CINZAS DE TERMOELÉTRICA NA PRODUÇÃO DE MUDAS DE <i>Eucalyptus grandis</i> Hill ex Maid..... | 32 |
| 2..1. INTRODUÇÃO..... | 34 |
| 2.2. MATERIAIS E MÉTODOS..... | 36 |
| 2.2.1. Localização da área..... | 36 |
| 2.2.2. Obtenção e preparo dos componentes dos substratos..... | 37 |
| 2.2.3. Formulação dos substratos..... | 40 |
| 2.2.3.1. Avaliações físicas dos substratos..... | 41 |
| 2.2.3.2. Avaliações químicas dos substratos..... | 42 |
| 2.2.3.3. Determinação de elementos inorgânicos e carbono orgânico total (COT) dos substratos..... | 42 |
| 2.2.4. Produção das mudas..... | 42 |
| 2.2.4.1. Avaliação das mudas: germinação e emergência..... | 43 |
| 2.2.4.2. Avaliações das mudas: parâmetros morfológicos..... | 44 |
| 2.2.4.3. Obtenção dos índices de qualidade das mudas..... | 44 |
| 2.2.5. Análise estatística..... | 45 |
| 2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 45 |
| 2.3.1. Avaliação dos substratos..... | 45 |

| | |
|--|------------|
| 2.3.1.1. Características físicas dos substratos..... | 46 |
| 2.3.1.2. Características químicas dos substratos..... | 51 |
| 2.3.1.3. Composição de elementos dos substratos..... | 53 |
| 2.3.1.4. Concentração de elementos traço nos substratos..... | 57 |
| 2.3.2. Produção de mudas de <i>Eucalyptus grandis</i>..... | 60 |
| 2.3.2.1. Avaliação de germinação e emergência..... | 60 |
| 2.3.2.2. Parâmetros morfológicos..... | 61 |
| 2.3.2.3. Índices de qualidade..... | 68 |
| 2.4. CONCLUSÃO..... | 70 |
| 2.5. REFERÊNCIAS..... | 71 |
| CAPÍTULO 3- AVALIAÇÃO ECOTOXICOLÓGICA DO USO DE BIOSSÓLIDO DA INDÚSTRIA DE PAPEL E CINZAS DE TERMOELÉTRICA NA COMPOSIÇÃO DE SUBSTRATOS..... | 79 |
| 3.1. INTRODUÇÃO..... | 81 |
| 3.2. MATERIAIS E MÉTODOS..... | 82 |
| 3.2.1. Localização..... | 82 |
| 3.2.2. Formulação dos substratos..... | 82 |
| 3.2.3. Ensaios ecotoxicológicos com organismos edáficos..... | 85 |
| 3.2.4. Ensaios ecotoxicológicos com espécies vegetais..... | 86 |
| 3.2.5. Análise estatística..... | 86 |
| 3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 87 |
| 3.3.1. Validação dos testes..... | 87 |
| 3.3.2. Ensaios ecotoxicológicos com invertebrados edáficos..... | 87 |
| 3.3.3. Ensaios ecotoxicológicos com espécies vegetais..... | 91 |
| 3.4. CONCLUSÃO..... | 96 |
| 3.5. REFERÊNCIAS..... | 97 |
| CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 101 |

CAPÍTULO 1- CONTEXTUALIZAÇÃO

1.1. INTRODUÇÃO GERAL

O crescimento populacional no Brasil e no mundo tem se tornado uma fonte crescente de preocupação, não apenas devido ao aumento de demanda por insumos e recursos necessários ao suporte desse crescimento, mas também em virtude do aumento de resíduos gerados diariamente, tanto pela população em geral quanto pelas indústrias. Esse aumento está relacionado ao desenvolvimento socioeconômico e ao crescimento do consumo. Além do elevado volume de resíduos produzido, outro aspecto relevante diz respeito à sua destinação, uma vez que grande parte destes materiais é descartada de maneira inadequada (IPEA, 2021).

De acordo com o último relatório da Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente (ABREMA), em 2023 o país produziu cerca de 81 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos, dos quais aproximadamente 93,4% foram coletados. Destes 6,7 milhões de toneladas foram enviados para reciclagem, 300 mil toneladas para compostagem 47,6 mil toneladas para geração de combustível e 69,3 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos receberam destinação adequada em aterros sanitários. No entanto, cerca de 4,6 milhões de toneladas de resíduos ainda foram descartadas de forma inadequada (ABREMA, 2024).

A gestão inadequada de resíduos sólidos não apenas agrava os impactos ambientais, como representa uma perda de recursos que poderiam ser reaproveitados em outras cadeias produtivas. Nesse contexto, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela lei federal nº 12.305/2010, estabelece diretrizes para o gerenciamento adequado de resíduos sólidos e diferencia os rejeitos dos resíduos sólidos. A PNRS define que rejeitos correspondem a materiais sem a viabilidade de reutilização ou reciclagem, enquanto os resíduos sólidos são materiais passíveis de reaproveitamento antes do descarte final ambientalmente apropriado (BRASIL, 2010).

Entre as formas de aproveitamento prevista pela PNRS, destaca-se a utilização destes resíduos em atividades agrícolas e florestais. As resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), como a Resolução nº 375/2006, que estabelece critérios para o uso agrícola de lodos de esgoto (biossólidos) gerados por estações de tratamento de efluentes

(ETE), e a Resolução nº 465/2014, que regula o uso de resíduos industriais em atividades agrícolas e florestais, incentivam o reaproveitamento desses materiais desde que não apresentem riscos à saúde humana e ao meio ambiente. A Resolução CONAMA nº 481/2017 atualiza e retifica as normativas anteriores, reforçando os critérios de segurança para o uso desses materiais.

O reaproveitamento de resíduos orgânicos apresenta diversos benefícios potenciais, especialmente no que concerne a melhorias das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo e substratos. A incorporação de materiais orgânicos pode elevar a concentração de nutrientes, aumentar a capacidade de retenção de água e melhorar a porosidade do solo. Além disso, a liberação de compostos presentes nos resíduos pode promover a elevação do pH, beneficiando o crescimento das plantas e promovendo maior atividade biológica e biodiversidade microbiana (SANTOS *et al.* 2015; CHEN; WU; OPOKU-KWANOWAA, 2019; RODRIGUEZ-ESPINOSA *et al.*, 2023).

Apesar dos benefícios potenciais, a utilização de resíduos, sobretudo os oriundos de processos industriais, requer cautela. A variabilidade na composição desses materiais que depende diretamente de sua origem e dos processos industriais ao qual foram submetidos, pode resultar na presença de substâncias tóxicas, elementos traço ou outros componentes com potencial contaminante. Assim, a legislação vigente prevê diretrizes rigorosas para mitigar os riscos associados ao uso desses resíduos, buscando garantir a segurança ambiental e a saúde humana (PIRES; MATTIAZZO, 2008; SANTOS *et al.* 2015; SZULC *et al.*, 2024).

Nesse contexto, a ecotoxicologia surge como uma ferramenta fundamental para avaliar os riscos ambientais associados ao uso de resíduos. Os testes ecotoxicológicos permitem identificar potenciais efeitos tóxicos dos resíduos sobre organismos edáficos e vegetais, contribuindo para a determinação de doses seguras e eficazes de reaproveitamento. Ao avaliar a toxicidade em organismos como enquitréideos, colémbolos e plantas, é possível prever impactos negativos no solo e na biota, garantindo que a aplicação dos resíduos não comprometa a biodiversidade nem a qualidade do ambiente (Oliveira Filho *et al.*, 2018; Baretta *et al.*, 2019).

A incorporação de testes ecotoxicológicos nos estudos de viabilidade do uso de resíduos, como biossólidos e cinzas em substratos, para produção de mudas florestais é essencial para assegurar que, além de promoverem o crescimento adequado das mudas, esses materiais não

causem danos ambientais a longo prazo. Dessa forma, a ecotoxicologia não apenas contribui para a segurança ambiental, mas também reforça a confiabilidade dos resultados obtidos em pesquisas destinadas ao reaproveitamento de resíduos (Oliveira Filho *et al.*, 2018).

No Brasil, a cultura florestal, em especial o cultivo de *Eucalyptus* spp. desempenha um papel estratégico na economia. O país é um dos maiores produtores mundiais de eucalipto, com vasta aplicação na indústria de papel e celulose. A área utilizada para o plantio de espécies florestais, em 2022, chegou a aproximadamente 10 milhões de hectares dos quais o cultivo de eucalipto abrange cerca de 76% (IBA, 2023). Entre as características que favorecem a preferência pela utilização das espécies de eucalipto estão seu rápido crescimento, ampla capacidade de adaptação climática, alta produtividade (média nacional de $41\text{ m}^3\text{ ha}^{-1}\text{ ano}^{-1}$) e diversidade de utilização da madeira (Santarosa; Penteado Júnior; Goulart, 2014; Moreira; Simioni; Buschinelli, 2021).

Assim, a produção de mudas de *Eucalyptus grandis* com alta qualidade e baixo custo torna-se essencial para atender à demanda do setor florestal. A utilização de substratos alternativos, como aqueles formulados a partir de biossólidos e outros resíduos industriais, pode ser uma solução promissora, desde que garantida sua eficiência no desenvolvimento das mudas e sua segurança ambiental (Trigueiro; Guerrini, 2003; Assenheimer, 2009; Klein, 2015).

Desta forma, há um esforço crescente para fomentar o reaproveitamento de resíduos dentro da própria cadeia produtiva, promovendo a redução do volume de resíduos destinados a aterros sanitários e lixões. No entanto, a reincorporação desses materiais nos ciclos produtivos exige estudos de viabilidade técnica, agronômica e ambiental, sobretudo quando se trata de atividades que envolvem materiais com potencial poluidor. Assim, este trabalho se apresenta como uma iniciativa relevante para contribuir com a economia circular e a sustentabilidade no setor florestal.

1.2. OBJETIVO

Avaliar o potencial de uso do biossólido proveniente da indústria de papel e celulose como componente de substrato, em associação com cinzas de origem vegetal, para a produção de mudas de *Eucalyptus grandis*. O foco da pesquisa está na eficiência do

desenvolvimento das mudas e na segurança ambiental, a partir de indicadores ecotoxicológicos e agronômicos.

1.2.1. Objetivos específicos

- Caracterizar física e quimicamente os substratos formulados com diferentes concentrações de bioSSólido;
- Avaliar o desempenho do substrato com diferentes concentrações de bioSSólido no desenvolvimento de mudas de *Eucalyptus grandis*;
- Avaliar, através de ensaios ecotoxicológicos, a toxicidade dos substratos com diferentes concentrações de bioSSólido em organismos edáficos (enquadrídeos e colêmbolos) e vegetais (alface e aveia);
- Indicar a concentração ideal de bioSSólido, considerando o melhor desempenho no crescimento de mudas e o menor impacto ambiental, com base nos testes ecotoxicológicos.

1.3. HIPÓTESES

- A adição de bioSSólido ao substrato altera as características físicas e químicas, melhorando a retenção de umidade e a disponibilidade de nutrientes essenciais para o desenvolvimento das mudas (Capítulo 2).
- O aumento da concentração de bioSSólido no substrato melhora o crescimento e a qualidade das mudas de *Eucalyptus grandis*, até um limite em que possíveis efeitos negativos, como salinidade excessiva ou toxicidade, podem comprometer o desenvolvimento das plantas. (Capítulo 2).
- A incorporação de bioSSólido ao substrato não causa efeitos tóxicos significativos para os organismos edáficos (*Enchytraeus albidus* e *Folsomia candida*) e vegetais (*Lactuca sativa* e *Avena sativa*), em determinadas concentrações, podendo até favorecer o desenvolvimento das plantas. No entanto, concentrações elevadas podem gerar impactos negativos devido à presença de metais pesados, excesso de nutrientes ou alterações na estrutura do substrato (Capítulo 3).

1.4. REFERENCIAL TEÓRICO

1.4.1. Substratos alternativos na produção de mudas florestais

O setor florestal se caracteriza por uma ampla gama de atividades, segmentos e produtos abrangendo desde a transformação da madeira em papel e celulose até a fabricação de móveis, carvão vegetal e produtos não madeireiros (Gouveia; Prado, 2022). No Brasil, essa atividade configura-se como um dos alicerces da economia nacional, sendo uma das 50 atividades de maior contribuição ao Produto Interno Bruto (PIB), e destacando como produtora de importantes itens de exportação do país (IBA, 2023).

Apesar da relevância econômica, a obtenção de produtos madeireiros de qualidade, depende de uma série de fatores que vão desde as condições de viveiro ao manejo no campo. Dentre estes fatores, a qualidade inicial das mudas obtidas em viveiro é essencial para assegurar uma matéria-prima com elevada capacidade de geração de produtos florestais (Wendling, 2014). A qualidade das mudas é influenciada por múltiplas condições, tais como viabilidade e sanidade das sementes e materiais propagativos, adubação e irrigação adequadas, além do substrato utilizado. Os substratos desempenham a função de sustentar a muda e fornecer nutrientes para seu crescimento (Wendling; Ferrari; Grossi, 2002).

Tradicionalmente, a produção de mudas florestais utiliza materiais como solo, areia, vermiculita e turfa como substrato (Souza, 2000). Contudo, esses materiais apresentam limitações significativas, como elevado custo e oferta restrita, uma vez que são insumos não renováveis ou de difícil renovação. Diante desse cenário, nas últimas décadas, intensificou-se a busca por materiais alternativos para composição de substratos com destaque para resíduos da agricultura e da indústria (Rocha *et al.*, 2013; Klein, 2015).

A utilização de resíduos como componentes de substratos oferece vantagens importantes. Além de serem materiais de custo baixo, esses resíduos são gerados em grande quantidade pelas atividades produtivas, podendo causar prejuízos ambientais caso não recebam destinação adequada. Estudos indicam que muitos destes materiais possuem potencial para atuar como fonte de nutrientes e condicionante na produção agrícola e florestal (Rocha *et al.*, 2013; Sperotto; Doll; Homczinski, 2023).

Contudo, nenhum material, seja resíduo ou não, é capaz de, isoladamente, fornecer todas características físicas e químicas ideais para o desenvolvimento das mudas. Por essa razão, os substratos são comumente formulados a partir de mistura de materiais de diferente natureza, buscando equilibrar suas propriedades (Klein, 2015). Nesse sentido, a combinação de materiais orgânicos com outros insumos tem sido uma estratégia amplamente adotada para otimizar o desempenho dos substratos. Nas últimas décadas, além dos resíduos orgânicos convencionais houve aumento da demanda pela utilização de materiais alternativos como os bioossólidos. Estes materiais além de possuírem larga oferta podem conter concentrações de nutrientes superiores às encontradas em outros materiais de origem orgânica (Assenheimer, 2009).

Outros materiais, principalmente de origem industrial, também têm sido explorados na produção de mudas e nos plantios de espécies vegetais. Entre estes materiais as cinzas obtidas pela queima de biomassa para produção de energia demonstram elevado potencial em razão da contribuição ao incremento de potássio e fósforo e a elevação do pH proporcionado por elas (Arruda *et al.*, 2016; Cavalcante Lopes, 2024).

1.4.1.1. Bioossólido

A resolução Conama 498 conceitua bioossólido como o produto do tratamento de lodo de esgoto que atende aos critérios químicos e microbiológicos previstos pela legislação estando apto a ser utilizado economicamente (Brasil, 2020). Os bioossólidos são obtidos pela estabilização do lodo gerado pelo tratamento das águas residuais realizados pelas estações de tratamento de efluentes (ETE's). Nessas estações, as águas residuais passam por processos físicos, químicos e, em alguns casos, microbiológicos, que promovem a redução e retirada de material mineral e orgânico, resultando no lodo (Maeda; Costa; Silva, 2010).

O bioossólido pode ser utilizado como fonte de matéria orgânica e nutrientes em substratos para a produção de mudas. A natureza deste material favorece a retenção de água através da maior proporção de microporos e contribui no aumento da capacidade de troca de cátions (CTC) em razão da presença de matéria orgânica (Trigueiro; Guerrini, 2003; Santos *et al.*, 2014; Zabotto *et al.*, 2022). Além de melhorar a estrutura física do substrato, os bioossólidos atuam como fonte de nutrientes como cálcio (Ca), fósforo (P), potássio (K) e, principalmente, nitrogênio (N). Outra vantagem é que esses nutrientes podem ser liberados

de forma gradual, reduzindo as perdas por lixiviação e aumentando a eficiência de absorção pelas plantas (Zabotto *et al.*, 2022).

A utilização de biofertilizantes como componente de substrato vem sendo testada com resultados promissores em diversas espécies vegetais. Trigueiro & Guerrini (2003) obtiveram resultados satisfatórios no desenvolvimento de mudas de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden utilizando biofertilizante na composição do substrato. De forma semelhante Abreu *et al.* (2019) observaram resultados positivos na produção de mudas de *Schinus terebinthifolia* Raddi. Viçosi *et al.* (2024) relataram melhor crescimento e qualidade das mudas de porta-enxerto cítricos ao utilizarem biofertilizantes em proporções de 60% e 45% de biofertilizante em relação ao substrato comercial.

O potencial positivo de uso de biofertilizantes na produção de mudas florestais e como fontes alternativas de nutrientes tem sido amplamente discutido por Cabreira *et al.* (2017), Ibrahim *et al.* (2018), Silva *et al.* (2018), Silva *et al.* (2022), Zabotto *et al.* (2022) e Sperotto; Doll & Homczinski (2023). No entanto, estes mesmos autores destacam a importância de se avaliar os biofertilizantes antes de sua aplicação, uma vez que a dose mais favorável pode variar de acordo com a origem e natureza do biofertilizante, assim como a espécie vegetal a ser utilizada. Além disso, testes ecotoxicológicos são essenciais para garantir que o uso desses materiais não comprometa a segurança ambiental, permitindo avaliar possíveis efeitos tóxicos sobre o solo e a fauna edáfica.

1.4.1.2. Cinzas

As cinzas de biomassa ou cinzas de caldeira são materiais obtidos a partir da combustão de materiais vegetais, principalmente madeira e cascas, para geração de energia (Marafon *et al.*, 2016). A utilização de cinzas de biomassa apresenta potencial como fonte de nutrientes, principalmente potássio (K) e fósforo (P), e como corretivo da acidez do solo na produção agrícola e florestal (Gonçalvez; Moro, 1995). A aplicação deste material nos solos tem apresentado resultados positivos na melhoria de suas propriedades físicas e químicas favorecendo a produção de espécies vegetais (Arruda *et al.*, 2016; Cardoso Júnior *et al.*, 2022).

Entre os benefícios da aplicação de cinzas ao solo, Gonçalves & Moro (1995) destacam a elevação dos níveis de pH, redução do Al extraível e aumento do teor de potássio

(K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e fósforo (P). Resultados semelhantes foram obtidos por Arruda et al. (2016); Fonseca & Hanisch (2018) e Piva; Brenner & Schmitt (2024) destacando o potencial deste material.

Considerando os efeitos positivos da aplicação das cinzas em solos, alternativas de aplicação têm sido exploradas como a utilização deste resíduo na composição de substrato para produção de mudas florestais (Vieira; Weber, 2017; Cavalcante Lopes, 2024). Contudo, embora as cinzas tenham sido exploradas em cultivos desenvolvidos e apresentem grande potencial, ainda há poucos estudos sobre os efeitos deste material como componente de substrato para produção de mudas florestais.

1.4.2. *Eucalyptus grandis*

As espécies do gênero *Eucalyptus* spp. compõem a maior proporção de árvores cultivadas para fins comerciais no Brasil correspondendo em 2022 a 76% da área plantada do país (IBA, 2023). Entre as espécies de eucalipto cultivadas, a espécie *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden e seus híbridos se destacam por ocupar as maiores áreas de plantio. Essa espécie pode ser cultivada em todo território brasileiro, contudo são mais recomendados a partir do estado do Paraná devido ao maior risco de geadas na região sul (Higa; Wrege; Garrastazu, 2014).

O clima da região de ocorrência natural de *E. grandis* é quente e úmido com temperatura média anual entre 14 e 22 °C e precipitação entre 690 e 2.490 mm. No entanto, apresenta grande plasticidade desenvolvendo-se em uma grande variedade de condições climáticas (Higa; Wrege; Garrastazu, 2014). Pertencente à família Myrtaceae, *Eucalyptus grandis* são árvores perenifólias de grande porte que podem atingir até 55 m de altura. Originárias da Austrália, possuem fuste reto de até 2 m de diâmetro. Amplamente utilizadas como matéria prima para fabricação de vigas, postes, pilares e celulose (Backes; Irgang, 2004).

O crescimento rápido, a capacidade de adaptação a diferentes regiões climáticas e a alta produtividade, com média nacional de 41 m³/há/ano, aliados a custos de produção relativamente baixos, consolidam as espécies de eucaliptos como as preferidas para a produção de madeira e celulose (Santarosa; Penteado Júnior; Goulart, 2014).

1.4.3. Ecotoxicologia

A ecotoxicologia é definida como a ciência que estuda o efeito de substâncias, naturais ou sintéticas, sobre os organismos vivos sejam animais ou vegetais (Oliveira Filho *et al.*, 2018). A avaliação ecotoxicológica é realizada por meio de testes que medem as respostas dos organismos expostos a diferentes concentrações da substância em análise. Estes testes podem ser classificados como agudos, quando avaliam efeitos de curta duração como letalidade, ou crônicos, quando investigam efeitos deletérios de longo prazo, como na redução da reprodução e população dos organismos (Bandarra *et al.*, 2019).

A ecotoxicologia se divide em duas grandes vertentes: aquática e a terrestre. Historicamente, a ecotoxicologia aquática recebeu maior atenção devido à necessidade de monitoramento da qualidade e contaminação das águas. No entanto, nas últimas décadas, houve um aumento na preocupação com a contaminação dos solos, o que impulsionou o desenvolvimento da ecotoxicologia terrestre, especialmente em estudos relacionados ao impacto de agrotóxicos (Oliveira Filho *et al.*, 2018)

No Brasil, a ecotoxicologia terrestre ainda é uma área em desenvolvimento. Apesar destas análises serem obrigatórios para agrotóxicos, ainda não são exigidas para todos os tipos de produtos e resíduos, principalmente aqueles destinados inadequadamente. No entanto as perspectivas de cenário futuro evidenciam sua necessidade de regulamentação (Bianchi *et al.*, 2010; Oliveira Filho *et al.*, 2018). Os ensaios ecotoxicológicos seguem normativas padronizadas internacionalmente e as diretrizes das ISO (International Organization for Standardization). A associação brasileira de normas técnicas (ABNT) apresenta versões traduzidas das ISO que determinam os procedimentos para realização de testes ecotoxicológicos com espécies de minhocas, colêmbolos e enquitreídeos (Sisinno; Sautter; Niva, 2019).

A avaliação de contaminação do solo através de testes ecotoxicológicos é internacionalmente reconhecida como um complemento à análise química. Enquanto a análise química quantifica a presença de elementos potencialmente tóxicos, a ecotoxicologia permite compreender como essas substâncias afetam os organismos vivos e o ambiente, e os dados obtidos auxiliam na definição das doses seguras de aplicação (Bianchi *et al.*, 2010). Os ensaios ecotoxicológicos empregados são classificados segundo a resposta dos organismos em ensaios de fuga, letalidade e reprodução. Os ensaios de fuga e letalidade são

caracterizados pela menor duração uma vez que avaliam efeitos agudos das substâncias sobre os organismos. Já os ensaios de reprodução são realizados por um período maior e tem como finalidade avaliar os efeitos da substância na sobrevivência e resiliência da população em estudo (Bianchi *et al.*, 2010; Oliveira Filho *et al.*, 2018).

Os resultados obtidos pelas avaliações ecotoxicológicas são traduzidos em parâmetros para melhor visualização do efeito tóxico. Os parâmetros mais utilizados são concentração de efeito não observado (CENO), concentração de efeito observado (CEO), concentração de efeito (CEx) e concentração letal (CLx). Com base, nos dados obtidos para CENO e CEO é possível determinar a CL ou CE de uma substância que depende das características avaliadas. Em ensaios de reprodução a CE₅₀, por exemplo, determina a concentração da substância responsável por reduzir em 50% a capacidade reprodutiva dos organismos em teste (Bandarra *et al.*, 2019).

A padronização dos ensaios ecotoxicológicos determina os organismos alvos passíveis de serem utilizados para a realização desses testes. Os organismos mais utilizados em ensaios de ecotoxicologia terrestre pertencem a ordem collembola (colêmbolos) e isopoda (enquadrídeos), além de organismos da subclasse Oligochaeta (minhocas). Entre estes destacam-se as espécies *Eisenia fétida* e *Eisenia andrei* (Oligochaeta), *Folsomia candida* (Collembola), *Enchytraeus crypticus* e *Enchytraeus albidus* (Sisinnio; Sautter; Niva, 2019).

Os Collembola e Isopodas têm sido utilizados como bioindicadores de degradação e modelo para ensaios ecotoxicológicos. A elevada sensibilidade à exposição de poluentes, o conhecimento detalhado de seu ciclo de vida aliado ao cultivo fácil e barato e o baixa longevidade destes organismos os tornam ideias para este fim (Oliveira Filho, 2018). Os Oligochaeta também são importantes bioindicadores, contudo, seu ciclo de vida longo e maior resiliência pode influenciar os resultados dos testes mascarando o real impacto sobre o ambiente (ISO, 2018).

Apesar de apresentarem maior sensibilidade os organismos edáficos não são os únicos alvos para realização de ensaios ecotoxicológicos. Espécies vegetais também podem ser utilizadas para avaliar o efeito tóxico das substâncias (fitotoxicidade). Os ensaios desenvolvidos com espécies vegetais podem avaliar apenas o efeito das substâncias sobre a capacidade de germinação das plantas em teste ou ainda seu desenvolvimento (SILVA,

2023). Várias espécies podem ser utilizadas para realização de avaliações ecotoxicológicas com espécies vegetais, no entanto, estes ensaios devem sempre conter duas espécies diferentes, uma monocotiledônea e uma dicotiledônea. Em geral, são utilizadas espécies de aveia (*Avena sativa* e *A. strigosa*) como monocotiledônea e alface (*Lactuca sativa*) ou rabanete bravo (*Raphanus raphanistrum*) como dicotiledônea (SILVA, 2023)

1.5. REFERÊNCIAS

ABREU, Alan Henrique Marques de; ALONSO, Jorge Makhlouta; MELO, Lucas Amaral de; LELES, Paulo Sérgio dos Santos; SANTOS, Gabriel Rocha dos. Caracterização de bioassílico e potencial de uso na produção de mudas de *Schinus terebinthifolia* Raddi. **Eng. Sanit. Ambient.**, v. 24, n. 3, p. 591-599, maio/jun, 2019. DOI: 10.1590/S1413-41522019108265

ARRUDA, Janelison Alves de; AZEVEDO, Thiago Anderson Oliveira de; FREIRE, Lucínio de Oliveira; BANDEIRA, Lucas Bochartt; ESTRELA, José Wellington de Medeiros; SANTOS, Sebastiana Joelma de Azevedo. Uso de cinza de biomassa na agricultura: efeitos sobre atributos do solo e resposta das culturas. **Revista principia**, n. 30, João Pessoa, PA, 2016. DOI: 10.18265

ASSENHEIMER, Adriane. Benefícios do uso de bioassílicos como substratos na produção de mudas de espécies florestais. **Revista Ambiência**, v. 5, n. 2, maio/ago., p. 321-330, 2009. Disponível em:

<https://revistas.unicentro.br/index.php/ambiente/article/view/345/pdf>

BACKES, Paulo; IRGANG, Bruno Edgard. **Árvores cultivadas no Sul do Brasil**: guia de identificação e interesse paisagístico das principais espécies exóticas. Santa Cruz do Sul: Instituto Souza Cruz, 204 p. 2004.

BANDARRA, Beatriz Sales; PEREIRA. Joana Luísa; MARTINS, Rui C.; QUINA, Margarida J. Avaliação ecotoxicológica para classificação de resíduos. **Revista Captar**, v.8, n. 2, p.51-66, 2019. DOI: <https://doi.org/10.34624/captar.v8i2.3540>

BARETTA, Dilmar; SEGAT, Julia Corá; OLIVEIRA FILHO, Luís Carlos Iuñes; Maccari, Ana Paula; SOUZA, José Paulo; RÖMBKE, Jörg. Ecotoxicologia terrestre com ênfase na

fauna edáfica (Capítulo 1), IN: NIVA, Cintia Carla; BROWN, George Gardner.

Ecotoxicologia terrestre: métodos e aplicações dos ensaios com oligoquetas. Embrapa, Brasília, DF, p. 23-27, 2019.

BIANCHI, Miriam de Oliveira; CORREIA, Maria Elizabeth Fernandes; RESENDE, Alexander Silva de; CAMPELLO, Eduardo Francia Carneiro. **Importância de estudos ecotoxicológicos com invertebrados do solo.** Embrapa Agrobiologia (Documentos 266), Seropédica, RJ, 32 p., 2010.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: set. 2024

CABREIRA, Gerhard Valkinir; LELES, Paulo Sérgio dos Santos; ALONSO, Jorge Makhlouta; ABREU, Alan Henrique de; LOPES, Nayara Franzini; SANTOS, Gabriel Rocha dos. Biossólido como componente de substrato para a produção de mudas florestais. **Floresta**, v. 47, n. 2, Curitiba, PR, p. 165-176, abr./jun., 2017. DOI:10.5380/rf.v47i1.44291

CARDOSO JÚNIOR, Cezar Dias; PIMENTA, Alexandre Santos; SOUZA, Elias Costa de; PEREIRA, Allana Katiussya Silva; DIAS JÚNIOR, Ananias Francisco. Uso agrícola e florestal do biochar: estudo da arte e futuras pesquisas. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 2, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i2.25999>

CAVALCANTE LOPES, Betel. **Uso de biocarvão em sistema de produção de mudas.** 2024. Tese (Doutorado em Ciência do Solo)- Centro de Ciências Agroveterinárias, Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2024.

CHEN, Xin; WU, Jun; OPOKU-KWANOWAA, Yaw. Effects of Organic Wastes on Soil Organic Carbon and Surface Charge Properties in Primary Saline-alkali Soil. **Sustainability**, v. 11, n. 24, p. 7088, 2019. DOI: 10.3390/su11247088.

FONSECA, José Alfredo da; HANISCH, Ana Lúcia. Cinza de biomassa é um produto eficiente para uso em sistema de produção de cereais em base agroecológica? **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 17, n. 4, Udesc, 2018. DOI: 10.5965/223811711732018454

GONÇALVES, José Leonardo de Moraes; MORO, Luiz. Uso de “cinza” de biomassa florestal como fonte de nutrientes em povoamentos puros de *Eucalyptus grandis*. IPEF, n. 48-49, p. 28-37, jan./dez., 1995.

GOUVEIA, Vera Maria; PRADO, Rachel Bardy. **Crescimento e intensificação da produção florestal brasileira** (versão 26). Embrapa, 2022.

HIGA, Rosana Clara Victoria; WREGE, Marcos Silveira; GARRASTAZU, Marilice Cordeiro. Espécies de eucalipto potenciais para reflorestamento no Estado do Paraná (Capítulo 4). In: SANTAROSA, Emiliano; PENTEADO JÚNIOR, Joel Ferreira; GOULART, Ives Clayton Gomes dos Reis (editores técnicos). **Transferência da tecnologia florestal: cultivo do eucalipto em propriedades rurais: diversificação da produção e renda**. Embrapa, Brasília, DF, p. 27-40, 2014.

IBÁ – INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório anual 2023**. São Paulo: IBÁ, 2023. Disponível em: <https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2023-r.pdf>. Acesso em: out. 2024.

IBRAHIM, João Felipe de Oliveira Nunes; SILVA JUNIOR, Irineu Vieira; BARROS, Fabiana da Costa; PAEZ, Doris Rakel Monteiro; NASCENTES, Alexandre Lioi; SILVA, Leonardo Duarte Batista da. Utilização de lodo de esgoto na produção de mudas e mo cultivo de eucalipto (*Eucalyptus spp.*). **Braz. J. Anim. Environ. Res.**, Curitiba, v. 2, n. 1, p. 564-579, jan./mar. 2019. Disponível em:

<https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BJAER/article/view/1442>

IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Resíduos sólidos urbanos no Brasil: desafios tecnológicos, políticos e econômicos**. Disponível em:
<https://www.ipea.gov.br/cts/pt/central-de-conteudo/artigos/artigos/217-residuos-solidos-urbanos-no-brasil-desafios-tecnologicos-politicos-e-economicos>. Out, 2021. Acesso em: set. 2024.

ISO 11268-1. Soil quality – **Effects of pollutants on earthworms** – Part 1: Determination of acute toxicity to Eisenia fetida/Eisenia andrei, 2018

KLEIN, Claudia. Utilização de substratos alternativos para produção de mudas. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 4, p. 43-63, 2015.

DOI: <https://doi.org/10.5380/rber.v4i3.40742>

MAEDA, Shizuo; COSTA, Epitágoras Rodson Oliveira; SILVA, Helton Damin da. **Uso de resíduos da fabricação de celulose e papel e da reciclagem de papel**. Embrapa Florestas, Documentos 202, Colombo, PR, 50 p., 2010.

MARAFON, Anderson Carlos; SANTIAGO, Antônio Dias; AMARAL, André Felipe Câmara; BIERHALS, Adriana Neutzling; PAIVA, Hugo Leôncio; GUIMARÃES, Victor dos Santos. **Uso de biomassa para geração de energia**. Embrapa Tabuleiros Costeiros, Documentos 211, Aracaju, SE, p. 28, 2016.

MOREIRA, José Mauro Magalhães Ávila Paz; SIMIONI, Flávio José; BUSCHINELLI, Cláudio César de Almeida. A viabilização econômica da cultura do eucalipto (Capítulo 25). IN: OLIVEIRA, Edilson Batista de; PINTO JÚNIOR, José Elidney (Editores técnicos). **O eucalipto e a Embrapa: Quatro décadas de pesquisa e desenvolvimento**. Embrapa, Brasília, DF, 2021.

OLIVEIRA FILHO, Luís Carlos Iuñes de; SEGAT, Julia Corá; BARETTA, Dilmar; KLAUBERG FILHO, Osmar (Org.). **Ecotoxicologia terrestre: métodos e aplicações de ensaios com collembola e isopoda**, UDESC, Florianópolis, SC, 2018

PIRES, Adriana M. M.; MATTIAZZO, Maria Emilia. Avaliação da viabilidade do uso de resíduos na agricultura. **EMBRAPA: Circular técnica 19**, Jaguariúna, SP, 2008. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/15550/1/circular19.pdf>

PIVA, Jonatas Thiago; BRENNER, Caroline Ferreira Ceia Ramos; SCHMITT, Djalma Eugênio. Uso de cinzas de madeira e cama de aviário no desenvolvimento inicial de *Eucalyptus benthamii*. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, UDESC, v. 23, n. 2, 2024.
DOI: 10.5965/223811712322024256

ROCHA, Igor, Tenório Marinho da; SILVA, Anibia Vicente da; SOUZA, Remy Farias de; FERREIRA, José Thales Pantaleão. Uso de resíduos como fonte de nutrientes na agricultura. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 8, n. 5,

edição especial, Mossoró, RN, p. 47-52, 2013. Disponível em:
<https://www.gvaa.com.br/revista/index.php/RVADS/article/view/2173/2110>

RODRÍGUEZ-ESPINOSA, Teresa; NAVARRO-PEDREÑO, Jose; GÓMEZ LUCAS, Ignacio; ALMENDRO CANDEL, María Belén; PÉREZ GIMENO, Ana; ZORPAS, Antonis A. Soluble Elements Released from Organic Wastes to Increase Available Nutrients for Soil and Crops. **Applied Sciences**, v. 13, n. 2, p. 1151, 2023. DOI: 10.3390/app13021151.

SANTAROSA, Emiliano; PENTEADO JÚNIOR, Joel Ferreira; GOULART, Ives Clayton Gomes dos Reis (editores técnicos). **Transferência da tecnologia florestal: cultivo do eucalipto em propriedades rurais: diversificação da produção e renda**. Embrapa, Brasília, DF, 138 p., 2014.

SANTOS, Fernando E. V.; KUNZ, Sustanis H.; CALDEIRA, Marcos V. W.; AZEVEDO, Carlos H. S.; RANGEL, Otacílio J. P. Características químicas de substratos formulados com lodo de esgoto para produção de mudas florestais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, n. 9, p. 971-979, 2014. DOI: DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v18n09p971-979>

SANTOS, Marcelo G. dos; BULEGON, Lucas G.; GONÇALVES JR., Affonso C.; SILVA, Tiago R. B. da; BRIESCH JUNIOR, Dionir L.; PORTO FILHO, Ibêre de S.; CAMPAGNOLO, Marcelo A. Resíduos industriais, seus impactos ambientais, e uma alternativa de uso através da agricultura. **Journal of Agronomic Sciences**, Umuarama, v. 4, n. especial, p. 564-562, 2015. Disponível em:
https://www.researchgate.net/publication/283329217_RESIDUOS_INDUSTRIAIS_SEUS_IMPACTOS_AMBIENTAIS_E_UMA_ALTERNATIVA_DE_USO_ATRAVES_DA_AGRICULTURA

SILVA, Francisca Alcivania de Melo; NUNES, Giovanna Margheri; GUERRINI, Jair Augusto Zano; SILVA, Reginaldo Barbosa. Resíduo agroindustrial e lodo de esgoto como substrato para produção de mudas de *Eucalyptus urograndis*. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 2, Santa Maria, RG, p. 827-835, abr./jun., 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.5902/1980509832101>

SILVA, Oclizio Medeiros das Chagas; ALMEIDA, Rodolfo Soares de; EVANGELISTA, Djavan Valentim da Paixão; MONTEIRO, Edevaldo de Castro. Uso alternativo do biossólido como constituinte de substrato para produção de mudas de espécies florestais: uma revisão sistemática. **Engenharia Florestal: contribuições, análises e práticas em pesquisa**, v.1, Editora Científica Digital, 2022.

SISINNO, Cristina Lúcia Silveira; SAUTTER, Klaus Dieter; NIVA, Cintia Carla. Ecotoxicologia terrestre e os instrumentos normativos e regulamentadores no Brasil. IN: NIVA, Cintia Carla; BROWN, George Gardner. **Ecotoxicologia terrestre: métodos e aplicações dos ensaios com oligoquetas**. Embrapa, Brasília, DF, p. 71-78, 2019.

SOBRAL, Leonardo F.; SOUZA, Renato; BARROS, Rodrigo T. Aproveitamento de resíduos sólidos urbanos na agricultura. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 26, n. 4, p. 763-773, 2021. Disponível em:
<https://www.scielo.br/j/esa/a/MY53xbTzPxYhz783xdmKc8F/?format=pdf&lang=pt>.
 Acesso em: out. 2024.

SOUZA, Francisco Xavier de. **Materiais para formulação de substratos na produção de mudas e no cultivo de plantas envasadas**. Embrapa Agroindustrial Tropical, Documentos 43, Fortaleza, CE, 21 p., 2000.

SPEROTTO, Jssyca; DOLL, Maria Magdalena Ribas; HOMCZINSKI, Isabel. Uso de lodo de esgoto em plantios florestais de espécies de *Eucalyptus* spp. **Revista Liberato**, v. 24, n. 42, Novo Hamburgo, RS, p. 105-208, jul/ dez., 2023. DOI: 10.31514/rlicherato.2023v24n42.p147

SZULC, Justyna; OKRASA, Małgorzata; NOWAK, Adriana; RYNGAJLLO, Małgorzata; NIZIOL, Joanna; KUZNIAK, Anna; RUMAN, Tomaz; GUTAROWSKA, Beata. Uncontrolled post-industrial landfill-source of metals, potential toxic compounds, dust, and pathogens in environment- a case study. **Molecules**, v.29, n.1496. DOI: 6.
<https://doi.org/10.3390/molecules29071496>

TRIGUEIRO, Rodrigo de Menezes; GUERRINI, Iraê Amaral. Uso de biossólido como substrato par produção de mudas de eucalipto. **Scientia Forestalis**, n. 64, p. 150-162, dez., 2003.

VIEIRA, Cristiane Ramos; WEBER, Oscarlina Lúcia dos Santos. Cinzas de madeira na produção de mudas de eucalipto. **Ecologia e Nutrição Florestal**, v. 5, n. 3, Santa Maria, RS, p. 68-77, set./dez., 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.5902/2316980X28216>

VIÇOSI, Karen Andreon; GARCIA, Giovanni de Oliveira; ZUCOLOTO, Moisés; BERILLI, Sávio da Silva. Biossólido na composição do substrato para produção de mudas de porta-enxertos cítricos. **Ver. Agro. Amb.**, v. 17, n. especial, p. 1-13, 2024. DOI: 10.17765/2176-9168.2024v17n.Especial.e12254

WENDLING, Ivar. Produção de mudas de eucalipto (Capítulo 5). In: SANTAROSA, Emiliano; PENTEADO JÚNIOR, Joel Ferreira; GOULART, Ives Clayton Gomes dos Reis (editores técnicos). **Transferência da tecnologia florestal: cultivo do eucalipto em propriedades rurais: diversificação da produção e renda**. Embrapa, Brasília, DF, p. 41-42, 2014.

WENDLING, Ivar; FERRARI, Márcio Pinheiro; GROSSI, Fernando. **Curso intensivo de viveiros e produção de mudas**. Embrapa Florestas, Documentos 79, Colombo, PR, 48 p., 2002.

ZABOTTO, Alessandro Reinaldo; SANTOS, Patrick Luan Ferreira dos; BROETTO, Fernando; GUERRINI, Iraê Amaral. Uso de lodo de esgoto na composição de substrato para produção de mudas de espécies arbóreas brasileiras. **Revista UNG- Geociências**, v. 21, n. 1, 2022. DOI: 10.33947/1981-741X-v21n1-4804

CAPÍTULO 2- UTILIZAÇÃO DE BIOSSÓLIDO DA INDÚSTRIA PAPELEIRA E CINZAS DE TERMOELÉTRICA NA PRODUÇÃO DE MUDAS DE *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo avaliar o potencial de uso de biossólido da indústria de papel e celulose como componente de substrato, em associação com cinzas de origem vegetal, para a produção de mudas de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. O biossólido foi obtido pela estabilização do lodo produzido pela Estação de Tratamento de Efluentes (ETE), em sistema de lodo ativado, da indústria de papel e celulose. As cinzas foram obtidas pela combustão de biomassa vegetal para produção de energia em termoelétrica. Os substratos foram formulados a partir de uma mistura composta por casca de pinus decomposta e casca de arroz carbonizada (1:1, v/v), enriquecidas com 15% cinzas, ao qual foram adicionadas doses crescentes de biossólido resultando nos tratamentos 0, 5, 10, 15 e 30% de acordo com a proporção de biossólido utilizada. Foi utilizado um substrato comercial como tratamento controle. As propriedades físicas e químicas dos substratos bem como os teores de carbono orgânico total (COT), nitrogênio total (N), fósforo total (P) e cádmio (Cd) foram determinados por laboratórios credenciados. A concentração de nutrientes e outros elementos foi determinada por espectroscopia de fluorescência de raios X (FRX). A germinação e os dias até início da emergência (DIE) foram avaliados em experimento isolado, com menor número de repetições, por meio de contagens realizadas a cada dois dias. A avaliação das mudas de *Eucalyptus grandis* foi realizada diretamente através de parâmetros morfológicos como altura, diâmetro a altura do coleto e biomassa acumulada. Também foram avaliados parâmetros radiculares (comprimento de raiz, diâmetro de raiz, área de projeção de raízes) por meio do software WhinRhizo. A partir dos dados obtidos foram determinados os índices de avaliação de qualidade das mudas. A adição de biossólido e cinzas promoveu melhoria nas propriedades físicas e químicas do substrato e aumento do teor de nutrientes, porém também houve aumento do teor de elementos traço. Contudo, verificou-se que as doses mais elevadas (15 e 30%) de biossólido promoveram o melhor crescimento e desenvolvimento das mudas.

Palavras-chave: Biossólido, cinzas de biomassa, eucalipto, substrato.

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the potential use of biosolids from the pulp and paper industry as a substrate component, in association with plant-derived ash, to produce *Eucalyptus grandis* Hill Ex Maiden seedlings. The biosolid was obtained through the stabilization of sludge produced by the Effluent Treatment Plant (ETP), activated sludge system, of the pulp and paper industry. The ash was obtained from the combustion of plant biomass for energy production in a thermoelectric power plant. The substrates were formulated using a mixture of decomposed pine bark and carbonized rice husk (1:1, v/v), enriched with 15% ash, to which increasing doses of biosolids were added, resulting in treatments 0, 5, 10, 15 e 30% biosolid content. A commercial substrate was used as the control treatment. The physical and chemical properties of the substrates, as well as the total organic carbon (TOC), total nitrogen (N), total phosphorus (P), and cadmium (Cd) contents, were determined by accredited laboratories. The concentration of nutrients and other elements was determined using X-ray fluorescence spectroscopy (XRF). Germination and days to emergence (DTE) were assessed in a separate experiment with fewer replications, based on counts performed every two days. The evaluation of *Eucalyptus grandis* seedlings was conducted through morphological parameters such as height, stem diameter at the root collar, and accumulated biomass. Root parameters (root length, root diameter, and root projection area) were also assessed using WinRhizo software. Based on the obtained data seedling quality indices were determined. The addition of biosolids and ash improved the physical and chemical properties of the substrate and increased nutrient content; however, it also led to an increase in trace element concentrations. Nevertheless, higher biosolid doses (15 and 30%) resulted in the best seedling growth and development.

Keywords: Biosolids, biomass ash, eucalyptus, substrate.

2.1. INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos maiores produtores e exportadores de papel e celulose do mundo, consolidando- se em 2022 como líder do mercado global ao obter uma receita anual de R\$ 260 bilhões. No mesmo ano, a produção de celulose do país chegou a 25 milhões de toneladas, 11 milhões de toneladas de papel e 8,5 milhões de m³ de painéis de madeira. O setor de produção florestal está entre as 50 atividades econômicas com maior contribuição para a renda do país. O país possui aproximadamente 10 milhões de hectares de árvores plantadas, dos quais 76% de eucalipto, 19% de pinus e 5 % de outras espécies, incluindo seringueiras, tecas e acácas (IBA, 2023).

As atividades industriais que envolvem o processamento físico e químico da madeira para produção de papel e celulose produzem grande quantidade de resíduos com alto percentual de matéria orgânica. São gerados durante esse processo restos de casca, lama de cal, resíduo celulósico, cinzas de caldeira e lodo obtido pelo tratamento dos efluentes gerados durante as atividades. Este setor possui uma significativa geração de resíduos, estima-se que são gerados aproximadamente 48 t de resíduos para cada 100 t de celulose produzida, sendo que grande parte desse material é destinado a aterros sanitários aumentando os custos de produção (Bellote *et al.*, 1998; Maeda *et al.*, 2007).

As águas residuais utilizadas durante o processo de fabricação do papel e celulose, passam por uma série de tratamentos nas estações de tratamento de efluentes- ETE's. Os sistemas de tratamento de efluentes têm como base a transformação de substâncias dissolvidas e em suspensão em gases inertes e compostos sólidos. Inicialmente, os efluentes são submetidos a uma série de processos físicos para retirada de sólidos sedimentáveis e flutuantes. Em seguida, produtos químicos podem ser adicionados a fim de possibilitar a coagulação de substâncias dissolvidas para posterior retirada. Este conjunto de processos visa separar o material orgânico da água gerando, após um período de estabilização, o que se denomina biossólido (Giordano, 2004; Coutinho; Jardim, 2014; Raifur *et. al.*, 2016).

O biossólido consiste em um material rico em matéria orgânica com potencial para ser utilizado como condicionante ou fertilizante de solo. A concentração de nutrientes nos biossólidos depende intensamente da matéria prima do qual se originam. No entanto, de uma forma geral, aponta-se a presença de cerca de 3% de nitrogênio, 2% de fósforo e 1% de potássio nesse tipo de material (Zabotto *et al.*, 2022). O teor elevado de matéria orgânica

proporciona o aumento da CTC quando adicionados ao solo através do maior número de cargas livres. Além disso, podem conter concentrações favoráveis de micronutrientes. Outra vantagem do uso de biofertilizantes consiste na capacidade de liberação lenta de nutrientes reduzindo a lixiviação quando comparada a adubação mineral (Zabotto *et al.*, 2022).

Apesar dos benefícios apresentados pelos biofertilizantes estes materiais também podem conter contaminantes como elementos traço, poluentes orgânicos, material sanitário e nutrientes em excesso, especialmente o nitrogênio. A avaliação rigorosa da presença de contaminantes nestes materiais é essencial a fim de garantir a segurança de sua utilização. A fim de regulamentar o uso de biofertilizantes e outros resíduos na agricultura foram criadas uma série de normativas e resoluções como a resolução CONAMA 498 de 2020 (Freddi, 2019; BRASIL, 2020; Puga *et al.*, 2023). A resolução CONAMA 498 de 2020 define os critérios para utilização e aplicação de biofertilizantes na agricultura, revogando as Resoluções nº 375/2006 e nº 380/2009. A normativa apresenta as características mínimas para classificação dos biofertilizantes em classes A e B de acordo com a concentração microbiana ou o processo de estabilização utilizado no material. Além disso, apresenta as concentrações mínimas permitidas de elementos traço no biofertilizante e suas possibilidades de aplicação (Brasil, 2020).

Os biofertilizantes têm sido utilizados na agricultura como fertilizante e condicionante de solo. Biofertilizantes de classe A podem ser aplicados até no máximo 30 dias antes da colheita ou pastejo em cultivos de alimentos consumidos crus, pastagens e forrageiras. Biofertilizantes de classe B possuem um período de carência de aproximadamente 120 dias para estas mesmas categorias. A aplicação deste material em frutíferas deve ser realizado após o período de colheita (Brasil, 2020). A CONAMA 498/2020 permite ainda a utilização de biofertilizantes de qualquer classe para fins de pesquisa e para produção de espécies vegetais não comestíveis. Os biofertilizantes têm sido explorados como fonte de nutrientes para produção de espécies florestais. A adubação de plantios florestais com biofertilizante têm apresentado resultados positivos. Há uma disponibilização gradual de nutrientes com incremento dos teores de Ca, P e K ao longo do tempo e maior disponibilidade de nitrogênio. Além disso, denota-se o incremento na produtividade dessas plantas (Vaz; Gonçalves, 2002; Ortega Rodriguez *et al.*, 2018).

Os biofertilizantes têm sido utilizados como componentes de substrato para produção de mudas de diversas espécies florestais. Abreu *et al.* (2019) demonstram o potencial do

biossólido na produção de mudas *Schinus terebinthifolia* Raddi, evidenciando o efeito positivo de doses entre 50% e 100% de biossólido. No entanto, Siqueira *et al.* (2019) obtiveram melhores resultados no desenvolvimento de mudas de *Plathymenia reticulata* Benth com proporções de biossólido menores entre 20 e 40%. Ibrahim *et al.* (2018) aponta o potencial de uso de biossólidos na produção de mudas de espécies de pinus e eucalipto.

Outro resíduo interessante para a composição de substratos são as cinzas de termoelétrica (Cavalcante Lopes, 2024). Este resíduo é obtido pela combustão de materiais orgânicos, normalmente restos vegetais, para obtenção de energia. As cinzas apresentam teores de carbono e sílica elevados, podem conter nutrientes como potássio e fósforo. Além disso, o processo favorece a criação de sítios de adsorção que podem reter água e nutrientes quando em formulações de substrato (Arruda *et al.*, 2016; Hansted *et al.*, 2023).

Apesar das vantagens apresentadas pelos biossólidos em geral evidencia-se a grande variabilidade destes materiais. A composição dos efluentes originários e os tratamentos posteriores a que são submetidos impactam diretamente a qualidade do biossólido formado. Estes estudos apontam a necessidade de caracterizar química e biologicamente os biossólidos a fim de garantir sua segurança para uso agrícola e florestal. Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o potencial de uso de biossólido proveniente da indústria de papel e celulose e de cinzas de termoelétrica na produção de mudas de *Eucalyptus grandis*.

2.2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.2.1. Localização da área

Os experimentos foram conduzidos no viveiro florestal e no Laboratório de Levantamento e Análises Ambientais do Centro de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina, localizado no município de Lages, SC ($27^{\circ} 48' 34,5''$ S, $50^{\circ} 22' 34,9''$ O). O clima da região é do tipo Cfb, segundo a classificação de Köppen. O clima Cfb (temperado, úmido, sem estação seca, com verão fresco) é caracterizado por temperatura média anual de $15,9^{\circ}\text{C}$ e precipitação pluvial média anual de aproximadamente 1.556 mm (Wrege *et al.*, 2011).

2.2.2. Obtenção e preparo dos componentes dos substratos

O biossólido foi obtido de empresa produtora e exportadora de papel e celulose brasileira, a partir de sua estação de tratamento de efluentes localizada na unidade de Otacílio Costa, SC ($27^{\circ} 28' 58''$ S, $50^{\circ} 07' 19''$ O). O material utilizado consiste em uma mistura de lodo primário e lodo secundário, obtidos na instalação, na proporção de 50%.

O lodo utilizado resulta do tratamento dos efluentes gerados pelos processos de extração da celulose. O efluente bruto é composto por fibras de celulose, licor preto e branca, lama de cal, dregs e outros resíduos. Inicialmente o efluente passa por um tratamento primário a fim de remover os sólidos suspensos através do processo de gradeamento. Em seguida o efluente é preparado para o tratamento secundário pelo sistema de lodo ativado também denominado tratamento biológico por meio de processos de peneiramento, decantação, correção do pH e resfriamento. Neste processo são utilizadas bactérias para o consumo de matéria orgânica em condição aeróbica (Klabin, s.d.).

O sistema de tratamento de efluentes por lodos ativados foi desenvolvido por volta de 1914 consistindo na aceleração do processo de oxidação e decomposição biológica da matéria orgânica dissolvida nos efluentes através do aumento da população biológica em um tanque controlado. Este processo se caracteriza pela eficiência na redução de cargas de poluentes orgânicos, baixo custo de investimento, menor infraestrutura exigida e manutenção da retenção de carbono no sistema. Ao final do processo, o tratamento o lodo biológico rico em matéria orgânica e microrganismos geralmente destinado a aterros sanitários, mas com potencial para ser utilizado como fertilizante ou condicionante para produção de espécies vegetais, de acordo com as normas vigentes (Foelkel, 2014).

A composição química do biossólido é apresentada na tabela 1.

Tabela 1- Teor de elementos inorgânicos no biossólido e porcentagem de recuperação dos elementos obtida para amostra certificada NIST 2709 A.

| Elementos g kg ⁻¹ | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|--|
| Al | Ca | Cu | Fe | K | Mg | Mn | P | Si | Ti | |
| 157,1 | 155,1 | 0,2 | 51,8 | 11,3 | 4,5 | 6,8 | 12,3 | 60,7 | 5,4 | |
| % Recuperação** | | | | | | | | | | |
| 125,9 | 146,6 | 138,5 | 139,3 | 121,0 | 132,5 | 113,7 | 366,7 | 99,7 | 130,0 | |
| Elementos mg kg ⁻¹ | | | | | | | | | | |
| As | Ba | Cr | Ni | Pb | Sr | V | Y | Zn | Zr | |
| 93,4 | 371,7 | 517,7 | 104,1 | 34,0 | 744,1 | 112,0 | -- | 1472,9 | 125 | |
| % Recuperação** | | | | | | | | | | |
| 85,6 | 91,6 | 68,4 | 116,1 | 98,2 | 135,4 | 90,0 | 131,2 | 121,3 | 111,0 | |

*Dados obtidos por fluorescência de raio-x (FRX); ** %Recuperação obtida com base no teor de elementos presentes na amostra NIST 2709 A recuperados pelo equipamento.

***Al: alumínio; As: arsênio; Ba: bário; Ca: cálcio; Cr: cromo; Cu: cobre; Fe: ferro; K: potássio; Mg: magnésio; Mn: manganês; Ni: níquel; P: fósforo; Pb: chumbo; Si: silício; Sr: estrôncio; Ti: titânio; V: vanádio; Y: Ytrium; Zn: zinco; Zr: Zircônio.

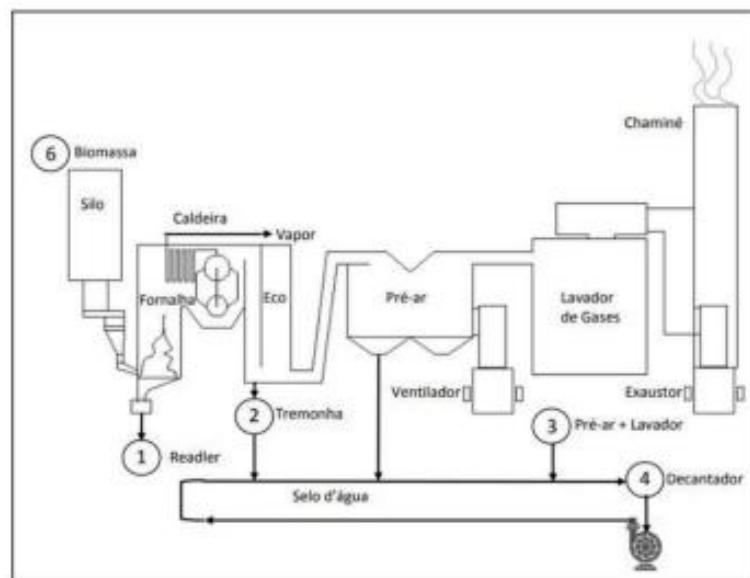
Fonte: elaborado pelo autor, 2024.

O material foi obtido com uma umidade em torno de 80 a 85%. Procedeu-se a secagem do biossólido em estufa de circulação de ar a 60 °C por aproximadamente 15 dias. O biossólido seco foi triturado em moinho martelo e peneirado em peneira de 2 mm.

As cinzas de termoelétrica foram obtidas de empresa brasileira de geração de energia, unidade localizada em Lages, SC (27° 48' 37" S; 50° 22' 20"O), em operação até 2023. As cinzas utilizadas neste experimento foram recolhidas no decantador, estrutura localizada no fim do processo de combustão (figura 1).

A biomassa utilizada para combustão é composta de pinus (99,5%) e eucalipto (0,5%), sendo 70% de cavaco, 25% de serragem e 5% de casca. A combustão ocorre em temperaturas entre 800 e 1000 °C. O processo de queima da biomassa ocorre na câmara de combustão (figura 1). As cinzas geradas são retiradas da fornalha por meio de um selo d'água e recolhida pelo *Reader*. O material passa então pela tremonha e em seguida é levado ao lavador de gases. As cinzas remanescentes passam por uma peneira rotativa e são encaminhadas ao decantador (Brand *et al.*, 2021).

Figura 1- Estrutura utilizada para combustão de biomassa e geração de energia



Fonte: adaptado de Brand *et al.*, 2021

A fim de padronizar as condições do material as cinzas obtidas com umidade em torno de 40 a 50% foram secas em estufa de circulação de ar a 60 °C por aproximadamente 3 dias. Após secas, as cinzas foram peneiradas em peneira de 2 mm. A tabela a seguir apresentam os teores de elementos presentes nesse material.

Tabela 2- Teor de elementos inorgânicos nas cinzas e porcentagem de recuperação dos elementos obtida para amostra certificada NIST 2709 A.

| Elementos g kg ⁻¹ | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|--|
| Al | Ca | Cu | Fe | K | Mg | Mn | P | Si | Ti | |
| 91,95 | 80,48 | 0,37 | 132,38 | 38,86 | 14,61 | 9,27 | 11,52 | 174,80 | 19,23 | |
| % Recuperação** | | | | | | | | | | |
| 125,9 | 146,6 | 138,5 | 139,3 | 121,0 | 132,5 | 113,7 | 366,7 | 99,7 | 130,0 | |
| Elementos mg kg ⁻¹ | | | | | | | | | | |
| As | Ba | Cr | Ni | Pb | Sr | V | Y | Zn | Zr | |
| 2,5 | 0 | 109,5 | 34,1 | 58,8 | | 448,1 | 39,4 | 857,0 | 473,8 | |
| % Recuperação** | | | | | | | | | | |
| 85,6 | 91,6 | 68,4 | 116,1 | 98,2 | 135,4 | 90,0 | 131,2 | 121,3 | 111,0 | |

*Dados obtidos por fluorescência de raio-x (FRX); ** %Recuperação obtida com base no teor de elementos presentes na amostra NIST 2709 A recuperados pelo equipamento.

***Al: alumínio; As: arsênio; Ba: bário; Ca: cálcio; Cr: cromo; Cu: cobre; Fe: ferro; K: potássio; Mg: magnésio; Mn: manganês; Ni: níquel; P: fósforo; Pb: chumbo; Si: silício; Sr: estrôncio; Ti: titânio; V: vanádio; Y: Ytrium; Zn: zinco; Zr: Zircônio.

Fonte: elaborado pelo autor, 2024.

Para a composição do substrato, através de fornecedores regulares, foram utilizadas cascas de pinus compostadas e cascas de arroz carbonizadas, materiais amplamente empregados em diferentes formulações de substratos para espécies florestais. Esses componentes contribuem para o aumento do teor de matéria orgânica, melhoram a retenção de água e promovem maior porosidade e espaço de aeração nas misturas (Fermino; Mieth, 2018).

2.2.3. Formulação dos substratos

Os tratamentos foram definidos com base em uma mistura inicial ou mistura base de composição única (tabela 3) A mistura base consiste em casca de pinus compostada e casca de arroz carbonizada em proporção 1:1 (v/v), peneirada em peneira de 8 mm, a qual adicionou-se 15% de cinzas, de acordo com o volume inicial.

A definição da dose de cinzas de biomassa a ser utilizada foi definida com base nos resultados preliminares obtidos por Cavalcante Lopes (2024) em que doses de cinzas de até 15% apresentaram propriedades físicas e químicas capazes de atender as exigências para produção de mudas. Além disso, mudas de bracatinga (*Mimosa scrabella* Benth) desenvolvidas em substrato comercial acrescido de doses de até 15% de cinzas obtiveram os melhores resultados em relação aos parâmetros morfológicos avaliados e o índice de qualidade de Dickson (IQD).

A partir da mistura base foram formulados os tratamentos com aumento gradual da dose de bioassólido. Além disso, utilizou-se um tratamento testemunha (T0) composto de substrato comercial Maxfertil® (substrato para plantas-misto) a fim de avaliar os efeitos do bioassólido sobre as plantas.

Tabela 3- Composição dos substratos com doses crescentes de biofertilizante utilizados no estudo

| Tratamentos | Composição |
|--------------------|--|
| T0 | Substrato comercial (Maxfertil) |
| T1 | Casca de pinus e casca de arroz (1:1, v/v) + 15% cinzas (Mistura base) |
| T2 | Mistura base + 5% de biofertilizante |
| T3 | Mistura base + 10% de biofertilizante |
| T4 | Mistura base + 15% de biofertilizante |
| T5 | Mistura base + 30% de biofertilizante |

Fonte: elaborado pelo autor, 2024

O substrato comercial utilizado consiste em um produto industrializado formulado com casca de pinus, cinzas, vermiculita, turfa, serragem e bioestimulantes. O substrato possui, segundo o fornecedor, cerca de 0,5% de corretivos de acidez, 0,5% de fosfato natural e 0,6% de fertilizante mineral NPK.

Os tratamentos foram identificados segundo a dose de biofertilizante aplicada em 0% (T1), 5% (T2), 10% (T3), 15% (T4) e 30% (T5). Para o substrato comercial utilizou-se a nomenclatura SB (T0).

2.2.3.1. Avaliações físicas dos substratos

Os tratamentos foram submetidos a análises físicas e químicas onde foram avaliadas a: densidade seca (DS), água disponível (AD), água facilmente disponível (AFD), água tamponante (AT), água remanescente (AR), capacidade de retenção de água (CRA), porosidade total (PT) e espaço de aeração (EA). Estas análises foram realizadas pelo

Laboratório de substratos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), localizado em Porto Alegre, RS, devidamente credenciado, onde as análises foram conduzidas em triplicata segundo as diretrizes da IN 17, de 21 de maio de 2007, e IN 31, de 23 de outubro de 2008.

2.2.3.2. Avaliações químicas dos substratos

As análises de condutividade elétrica (CE) e potencial hidrogeniônico (pH) foram realizadas pelo Laboratório de substratos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), localizado em Porto Alegre, RS. As análises foram conduzidas em triplicata segundo as diretrizes da IN 17, de 21 de maio de 2007, e IN 31, de 23 de outubro de 2008

2.2.3.3. Determinação de elementos inorgânicos e carbono orgânico total (COT) dos substratos

As análises químicas elementares foram realizadas no Centro de Ciências Agroveterinárias CAV, UDESC, por meio da técnica de espectroscopia de fluorescência de raio X (FRX).

Os teores de carbono orgânico total, nitrogênio total, fósforo total e cádmio foram obtidos pelo laboratório Terranalises de Fraiburgo, SC. Carbono orgânico total e fósforo total foram determinados segundo o Manual de Métodos Analíticos oficiais para Fertilizantes e Corretivos (2017). Nitrogênio total foi determinado segundo a IN 07/2007 e cádmio pelo método USEPA 3050B.

2.2.4. Produção das mudas

O crescimento das mudas foi realizado no viveiro florestal do CAV/ UDESC em casa de vegetação com irrigação automática por microaspersão (3 vezes ao dia, com duração de 5 min). Foram utilizadas 50 repetições por tratamento. Cada repetição composta por um tubete de 110 cm³ ao qual foram adicionados os tratamentos e cerca de 0,02 g de sementes de *Eucalyptus grandis*. As sementes foram obtidas do Instituto de Pesquisa e Estudos

Florestais- IPEF. As sementes obtidas pertenciam ao lote de 2006, correspondente a geração F2, com germinação de aproximadamente 800 mil sementes por quilo.

O experimento foi implantado no dia 28 de março de 2024. Não foram realizadas adubações de base a fim de avaliar a capacidade dos substratos em fornecer nutrientes as fases iniciais das mudas. No entanto, devido os tratamentos SB e 0% apresentarem sinais de deficiência de nitrogênio realizou-se adubação com 120 g de Osmocote® dissolvidos em 2 L de água aos 60 dias, sendo administrados 10 ml por tubete. Posteriormente, realizou-se adubação de todos os tratamentos com 0,57 g de MAP (fosfato monoamônico) e 0,31 g de KNO₃, diluídos em 5 L de água, aproximadamente 100 dias após a semeadura. Os fertilizantes foram diluídos em água para facilitar a absorção pelas plantas e evitar um potencial efeito de salinização.

O tempo de produção de mudas de *Eucalyptus grandis* pode variar entre 3 e 5 meses aproximadamente. Reis *et al.* (2008) determina que, com base em parâmetros morfológicos, mudas de *Eucalyptus grandis* devem permanecer em viveiro entre 100 e 115 dias após emergência (DAE). Enquanto Eloy *et al.* (2014) destacam um período de permanência entre 110 e 150 DAE. Com base nisso, determinou- se para este experimento um período de permanência em viveiro de 120 dias. No entanto, ressalta-se as mudas são consideradas aptas para plantio através de avaliação morfológica quando atingem 25 cm de altura e no mínimo 2 mm de diâmetro a altura do coletor.

2.2.4.1. Avaliação germinação e emergência

A germinação e os dias até iniciar emergência (DIE) foram avaliados em paralelo. Para estas avaliações foram utilizadas 10 repetições por tratamento sob as mesmas condições do experimento principal. Em cada repetição foram semeadas 5 sementes de *Eucalyptus grandis* sendo consideradas germinadas as plântulas a partir da exposição dos cotilédones à superfície. Foram consideradas mudas sobreviventes as plântulas vivas ao fim do período de observação. As sementes mortas ou não germinadas não foram diferenciadas sendo avaliadas em razão da diferença entre o número de sementes utilizadas e o número de plântulas germinadas. As observações foram realizadas a cada dois dias por um período de aproximadamente 30 dias. Sementes mortas e plântulas mortas antes da exposição dos cotilédones não foram diferenciadas.

2.2.4.2. Avaliações das mudas: parâmetros morfológicos

Durante o período de crescimento foram realizadas a retirada de espécies invasoras dos tubetes. Além disso, realizou-se o desbaste das mudas, sendo mantida uma planta por tubete. Após o período de crescimento de 120 dias, todas as mudas que permaneceram viáveis em cada tratamento foram retiradas e procedeu-se as avaliações morfológicas. Foram utilizadas 37 mudas para o substrato comercial (SB), 39 para o substrato com 0% de biossólido, 40 para 5%, 47 para 10%, 45 para 15% e 39 unidades para o tratamento com 30% de biossólido. A utilização de todas as mudas viáveis para avaliação dos parâmetros morfológicos teve como objetivo garantir que a confiabilidade dos resultados mediante a variabilidade natural das sementes.

Foram realizadas medidas de altura (H) e diâmetro à altura do coleto (DC) com as mudas ainda em viveiro. Após a colheita as mudas foram avaliadas quanto a massa fresca e massa seca da parte aérea (MFPA e MSPA), massa fresca e massa seca de raízes (MFR e MSR) e parâmetros radiculares. Entre os atributos radiculares foram avaliados comprimento de raiz (CR), diâmetro de raiz (DR), área de projeção de raízes (APR), área superficial das raízes (ASR) e volume de raízes (VR). Os atributos radiculares foram mensurados por meio do *software* WinRhizo a partir de imagens obtidas pelo programa.

2.2.4.3. Obtenção dos índices de qualidade das mudas

A partir dos parâmetros avaliados foram calculados os índices de relação altura pelo diâmetro a altura do coleto (RHDC), relação altura pela massa seca da parte aérea (RHMSPA) e o coeficiente de Dickson (IQD).

A relação da altura pelo diâmetro a altura do coleto é calculada pela fórmula:

$$\text{RHDC} = \frac{H}{DC}$$

Em que H é a altura da muda medida da superfície do substrato ao ápice do meristema apical em cm, e DC é o diâmetro medido a altura do coleto em mm.

A relação altura pela massa seca da parte aérea é calculada pela fórmula:

$$\text{RHMSPA} = \frac{H}{MSPA}$$

Sendo MSPA a massa em g da parte aérea obtida após secagem do material vegetal em estufa a 60°C por pelo menos 48 h.

O coeficiente de Dickson é calculado pela fórmula:

$$IQD = \frac{MST}{\left[\left(\frac{H}{DC} \right) + \left(\frac{MSPA}{MSR} \right) \right]}$$

Em que: IQD: índice coeficiente de Dickson, MST: massa seca total (g), H: altura (cm), DC: diâmetro a altura do coleto (mm), MSPA: massa seca da parte aérea (g) e MSR: massa seca da raiz (g).

A altura foi obtida com auxílio de régua graduada sendo considerada da superfície do substrato até a extremidade do meristema apical, o diâmetro a altura do coleto por meio de paquímetro digital de fibra de carbono e as medidas de massa por balança analítica com precisão de 0,0001.

2.2.5. Análise estatística

Os dados das variáveis avaliadas foram testados para normalidade por meio do teste de Shapiro-Wilk sendo realizada transformação de Box-Cox quando necessário. Os dados foram submetidos a análise de variância (ANOVA) e as médias comparadas pelo teste de Tukey a 5% de significância. Para a realização destes foi utilizado o *software* Minitab Statistical 22.

Variáveis que não atenderam os pressupostos de normalidade foram submetidas ao teste de Kruskal-Wallis e as médias comparadas pelo teste de comparações Post-Hoc de Dunn a 5% de significância pelo *software* Jasp (Jeffreys's Amazing Statistics Program).

2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1. Avaliações dos substratos

2.3.1.1. Características físicas dos substratos

As propriedades físicas espaço de aeração (EA), água disponível (AD), água facilmente disponível (AFD), água tamponante (AT), água remanescente (AR), capacidade de retenção de água (CRA) e densidade seca (DS), diferiram estatisticamente (Tabela 4).

Tabela 4- Propriedades físicas porosidade total (PT) espaço de aeração (EA), água disponível (AD), água facilmente disponível (AFD), água tamponante (AT), água remanescente (AR), e densidade seca (DS) dos substratos tratados com doses crescentes de biossólido.

| Propriedades | Doses de biossólido no substrato | | | | | | |
|--------------------------|---|-----------|-----------|------------|------------|------------|---------------|
| | SB | 0% | 5% | 10% | 15% | 30% | CV (%) |
| PT (%) | 86,1 a | 78,0 b | 75,8 c | 76,9 c | 75,0 c | 77,8 b | 4,9 |
| EA (%) | 35,6 c | 44,7 a | 40,2 b | 36,9 b | 38,6 b | 32,8 d | 10,4 |
| AD (%) | 15,3 a | 12,3 b | 13,1 b | 15,4 a | 13,0 b | 16,2 a | 11,5 |
| AFD (%) | 13,1 a | 9,3 c | 8,2 c | 11,5 b | 10,0 c | 12,4 a | 20,4 |
| AT (%) | 2,2 c | 3,0 b | 4,9 a | 3,9 b | 3,0 b | 3,8 b | 41,3 |
| AR (%) | 35,0 a | 20,9 e | 22,4 d | 24,5 c | 23,3 c | 28,7 b | 19,15 |
| DS (g cm ⁻³) | 0,30 b | 0,20 d | 0,23 d | 0,26 c | 0,30 b | 0,41 a | 24,4 |

*Médias seguidas pela mesma letra, na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Dunn a 5% de significância para PT e pelo teste de Tukey para as demais variáveis.

**PT: porosidade total; EA: espaço de aeração; AD: água disponível; AFD: água facilmente disponível; AT: água tamponante; AR: água remanescente; DS: densidade seca.

Fonte: elaborado pelo autor, 2024.

A porosidade total foi maior no substrato comercial (SB) sendo 86,1%. Os substratos com 0% e 30% de biossólido obtiveram melhor resposta para porosidade dentre os tratamentos formulados com valores de 78,0 e 77,88%, respectivamente (Tabela 4). A menor porosidade foi observada com a dose de 15% de biossólido. Fermino; Mieth (2018) definem como ideal em substratos para produção de mudas florestais uma porosidade total entre 75 e 85%. Dessa forma, os tratamentos avaliados possuem porosidade considerada adequada.

O espaço de aeração se apresentou maior nos tratamentos com menor dose de bioassólido (0 e 5%) provavelmente devido a maior quantidade, em proporção, de casca de pinus compostada e casca de arroz carbonizada (Tabela 3). Estes materiais contribuem para uma maior macroporosidade originando um substrato com menor densidade, indicada pela densidade seca (DS).

Segundo Kratz *et al.* (2013) a utilização de cascas de arroz carbonizada em formulações de substratos aumenta a macroporosidade proporcionando maior capacidade aeração. Contudo, verificaram que a utilização de altas doses deste material torna-se inviável devido a elevada necessidade de irrigação uma vez que a água é facilmente perdida. Por outro lado, também verificaram que a adição de bioassólido em substratos aumenta a quantidade de microporos e a capacidade de retenção de água. O mesmo comportamento referente ao aumento da macroporosidade em substratos com maior teor de cascas de arroz e a redução da mesma em favor da microporosidade a partir da adição de bioassólido foi observada por Kratz *et al.* (2017).

Uma maior microporosidade está associada a uma maior capacidade de retenção de água. Kratz *et al.* (2017) constataram que materiais com maiores capacidades de retenção de água promoveram melhor crescimento de mudas de *Eucalyptus urograndis*. Segundo estes os tratamentos contendo bioassólido obtiveram resultados satisfatórios ao aliarem um bom crescimento das mudas com um menor custo para produção. Destacam ainda que a utilização de cinzas pode auxiliar na redução de custos e propiciar melhores propriedades físicas ao substrato.

No entanto, a utilização de materiais com excesso de umidade, característica de materiais ricos em matéria orgânica como os bioassólidos, pode prejudicar a capacidade de aeração do substrato. Dessa forma, a utilização de matérias de maior granulometria, capazes de promover uma maior macroporosidade, é essencial a fim de estabelecer um equilíbrio entre macro e microporos no substrato. A casca de arroz carbonizada tem sido um dos materiais mais indicados para isto uma vez que além proporcionar maior capacidade de aeração aos substratos possui custos relativamente baixos (Guerrini; Trigueiro, 2004; Kratz *et al.*, 2013; Kratz *et al.*, 2017).

Além disso, há uma relação inversamente proporcional entre o espaço de aeração (macroporos) e a densidade dos substratos. Substratos com maior quantidade de macroporos

tendem a ser menos densos e, consequentemente, menos propensos a compactação. Substratos de densidade muito baixa proporcionam pouco apoio ao crescimento das plantas, por outro lado, substratos muito densos são mais suscetíveis a compactação dificultando o crescimento de raízes (Zorzeto *et al.*, 2014).

Os tratamentos utilizados apresentaram valores de densidade entre 0,20 e 0,41 g cm⁻³ (Tabela 4). A menor densidade foi obtida no substrato com 0% de bioossólido (0,20 g cm⁻³) condição provavelmente propiciada pela maior proporção de casca de arroz na mistura comparada aos outros tratamentos (Tabela 3). Além disso, pode ser observado um aumento significativo na densidade dos substratos conforme aumento da dose de bioossólido utilizada sendo a mais obtida na dose de 30% do material (0,41 g cm⁻³). No entanto, considerando as a densidade ideal entre 0,25 e 0,5 g cm⁻³, com exceção dos tratamentos com 0 e 5% de bioossólido, que apresentam densidade de 0,20 e 0,23 g cm⁻³, respectivamente, os substratos testados possuem densidade considerada adequada.

Apesar da natureza do material apresentar grande influência na determinação da densidade de um substrato, o valor considerado ideal depende ainda do tipo de recipiente utilizado e da espécie vegetal a ser produzida. No entanto, de forma geral, substratos com densidades entre 0,1 e 0,3 g cm⁻³ são indicados para utilização em tubetes de pequeno volume (até 120 cm³). Outros autores, contudo, apontam que a densidade ideal de substratos em geral é em torno de 0,25 a 0,5 g cm⁻³ (Kratz *et al.*, 2013).

Assim como uma menor densidade está associada a uma maior macroporosidade, uma densidade mais elevada sugere materiais com maior quantidade de microporos. A microporosidade se relaciona com a capacidade de reter e disponibilizar água. A água disponível (AD) aponta o teor de água no substrato podendo ser dividida em água facilmente disponível (AFD) e água tamponante (AT). A AD considerada ideal é em entre 30 e 50% (Kratz et. al. (2013); Fermino; Mieth, 2018). A AFD consiste na água que pode ser facilmente absorvida pelas plantas sendo considerados adequados valores entre 20 e 30%. A AT determina a água cuja absorção é mais difícil devendo permanecer em teores entre 10 e 20%. Enquanto a água remanescente (AR) é aquela que as plantas não conseguem absorver devido à forte interação entre as moléculas e o material devendo estar entre 5 e 15% (Kratz et al. 2013; Fermino; Mieth, 2018).

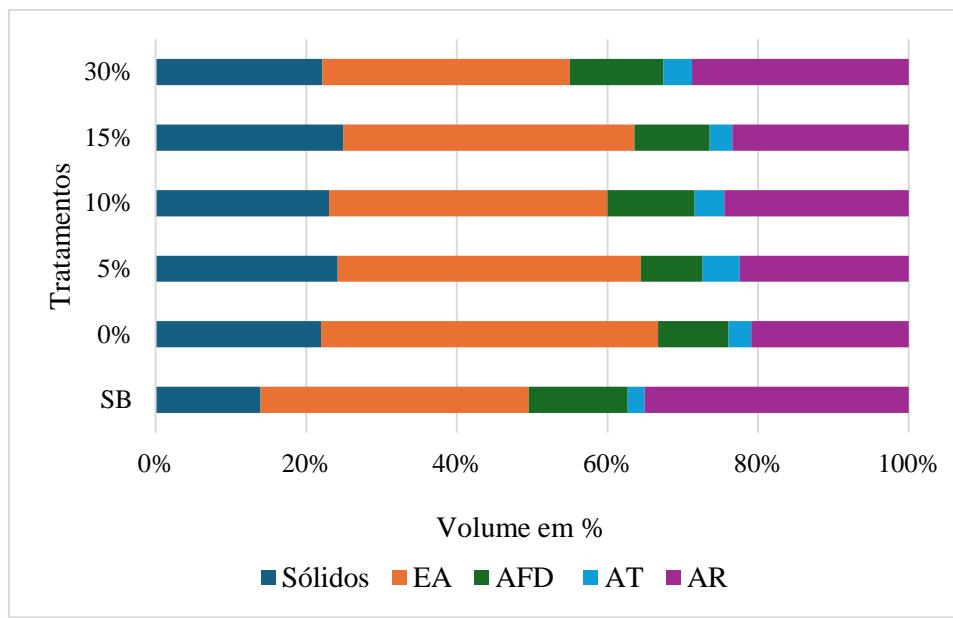
Os substratos com 10 e 30% de bioassólido obtiveram os melhores percentuais de AD não apresentando diferença estatística do substrato comercial (Tabela 4). O substrato com 30% de bioassólido também apresentou a maior AFD enquanto a maior AT pode ser encontrada no substrato com 5% de bioassólido. Contudo, os valores de AD, AFD e AT encontrados para os substratos foram inferiores ao ideal inclusive no substrato comercial (Tabela 4). Além disso, a AR mostrou-se superior ao limite máximo considerado ideal para produção de mudas. Apesar de não invalidar a utilização dos substratos, este fato implica a necessidade de irrigação mais frequente a fim de garantir a disponibilidade de água para as mudas.

Segundo Cavalcante Lopes (2024) a utilização de cinzas de biomassa na composição de substratos também pode afetar a distribuição de micro e macroporos dos substratos favorecendo a criação de microporos e a retenção de água. Os resultados obtidos em seu trabalho apontam que doses de cinzas até 15% podem atender as exigências para produção de mudas, contudo concentrações mais elevadas podem reduzir significativamente a capacidade de aeração do substrato.

Entre os substratos formulados, o tratamento com 30% de bioassólido apresentou o maior teor de AD (16,2%) bem como bem como de AFD (12,4%) e AR (28,7%). Por outro lado, o tratamento com 0% de bioassólido obteve os menores valores para as mesmas variáveis (Tabela 4) evidenciando a contribuição do bioassólido no aumento da capacidade de retenção de água e na possibilidade da disponibilização desta para as mudas. Os resultados obtidos por Guerrini; Trigueiro (2004), Kratz *et al.* (2013), Zorzeto *et al.* (2014) e Kratz *et al.* (2017) demonstraram comportamento semelhantes aos deste estudo. De forma geral, a adição de materiais orgânicos como bioassólidos aos substratos tem a capacidade de aumentar o teor de microporos e, consequentemente, favorecer a retenção de água.

A figura 2 relaciona as propriedades físicas apresentadas pelos substratos apresentando suas proporções de material sólido, ar e água.

Figura 2 -Proporção de componentes dos substratos com doses crescentes de biossólido em porcentagem- Sólidos, EA, AFD, AT e AR



*EA: espaço de aeração; AFD: água facilmente disponível; AT: água tamponante; AR: água remanescente.

Fonte: elaborado pelo autor, 2024

A figura 2 demonstra a relação entre o volume ocupado pelo material sólido e pelos poros no substrato. Com base nela, pode se estimar a proporção de macro, meso e microporos através do EA, AT e AR.

Os substratos formulados (0%, 5%, 10%, 15% e 30%) apresentaram teor de sólidos próximo a 20%, considerando os materiais utilizados (Tabela 3) indica um maior teor de material orgânico quando comparado ao substrato comercial. Isto pode indicar uma maior capacidade de fornecer nutrientes e sustentação às plantas, embora teores elevados de sólido também podem proporcionar o aumento da densidade do substrato favorecendo sua compactação. No entanto, como aponta a figura 2, e pode ser avaliado na tabela 4, os substratos formulados com biossólido apresentam porosidade total relativamente alta propiciando maior equilíbrio entre micro e macroporos. Com base nas variáveis analisadas, os substratos com maiores teores de biossólido podem ser mais propensos a produzir mudas de qualidade.

2.3.1.2. Características químicas dos substratos

Os substratos avaliados apresentaram variação em relação ao pH, o contrário sendo observado quanto a condutividade elétrica (CE) (Tabela 5).

Tabela 5- Propriedades químicas condutividade elétrica (CE) e pH dos substratos com doses crescentes de bioossílico

| Propriedades | SB | Doses de bioossílico no substrato | | | | | | CV (%) |
|-----------------------------|-----------|--|-----------|------------|------------|------------|------|---------------|
| | | 0% | 5% | 10% | 15% | 30% | | |
| CE (mS cm^{-1}) | 0,18 c | 0,14 c | 0,23 c | 0,36 b | 0,39 b | 0,55 a | 46,2 | |
| pH (H_2O) | 6,1 b | 7,0 a | 7,4 a | 7,3 a | 7,3 a | 7,5 a | 9,2 | |

*Médias seguidas da mesma letra, na linha, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de significância.

*CE: condutividade elétrica; pH: potencial hidrogênioiônico

Fonte: elaborado pelo autor, 2024.

Os substratos apresentaram elevação dos valores de CE com o aumento da dose de bioossílico. O pH de todos os substratos formulados foi superior a 7,0 a elevação observada com o aumento da dose de bioossílico aponta que este material teve pouca influência neste atributo. Os valores de pH mais elevados obtidos nos substratos formulados podem ser consequência da utilização das cinzas de caldeira em sua composição (Tabela 3). A utilização das cinzas de biomassa como agente alcalinizante é comparável aos calcários comerciais em virtude de sua capacidade de elevação do pH (Arruda *et al.*, 2016). Tal efeito pode estar associado ao elevado teor de óxidos presentes nas cinzas obtidos por meio da combustão controlada do material vegetal como determinado por Brand *et al.* (2021).

Segundo Kratz *et al.* (2013) alguns autores indicam como ideal uma faixa de pH entre 5,5 e 6,5, enquanto, outros defendem um intervalo menor com pH entre 5,2 e 5,5. Contudo, Santos *et al.* (2014) utiliza como base uma faixa de pH entre 5,5 e 5,8 como valores adequados ao trabalhar com substratos a base de lodo de esgoto na produção de mudas florestais. De forma geral, estipula-se para produção de espécies vegetais a elevação de pH

acima de 5,5 ponto em que não há mais alumínio em solução capaz de prejudicar o crescimento radicular, embora algumas espécies como o *Pinus* spp. Tenham preferência por faixas de pH mais ácidas inferiores a 5,5.

Com base nisso, verifica-se que todos os tratamentos, inclusive o substrato comercial, apresentaram pH superior aos limites máximos considerados na literatura (Tabela 5). Apesar deste fator reduzir a possibilidade de toxidez de alumínio, teores de pH muito elevados podem também prejudicar o desenvolvimento das plantas, principalmente devido à redução na disponibilidade de micronutrientes, efeito este comum a muitas espécies vegetais (Bitencourt; Deknes; Laura, 2022). O efeito das cinzas de biomassa sobre o pH dos substratos foi apontado por Cavalcante Lopes (2024) que também observou o aumento da condutividade elétrica a partir da adição das cinzas ao substrato comercial. No entanto, defende que esses podem ser modificados através de tratamento de pré-lavagem ou posterior ajuste de pH.

Por outro lado, observa-se que houve elevação da condutividade elétrica com o aumento do teor de biofertilizante no substrato (Tabela 5). O aumento da CE pode estar relacionado ao maior teor de nutrientes devido a maior proporção de biofertilizante ou ainda estar relacionado ao aumento de cargas elétricas em virtude do maior teor de matéria orgânica e nutrientes propiciado por este material.

O maior valor de CE de $0,55 \text{ mS cm}^{-1}$ foi obtido pelo substrato com 30% de biofertilizante. Kratz *et al.* (2013) aponta que CE superior a $3,5 \text{ mS cm}^{-1}$ em substratos são considerados excessivos para a maioria das espécies vegetais favorecendo a ocorrência de problemas relacionados a salinidade. Guerrini; Trigueiro (2004), no entanto, afirmam que a condutividade elétrica do substrato não deve ser superior a $1,0 \text{ mS cm}^{-1}$. De forma geral, os substratos avaliados não apresentaram condutividade elétrica (Tabela 5) superior a indicada por outros autores. Ressalta-se ainda que o comportamento de elevação da condutividade elétrica com o aumento da dose de biofertilizante adicionada ao substrato também foi observada por Guerrini; Trigueiro (2004) e Kratz *et al.* (2013).

2.3.1.3. Composição de elementos dos substratos

Foram obtidos os seguintes resultados para fósforo total (P), carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (N), expostos na Tabela 6. A partir dos dois últimos foi calculada a relação C/N dos substratos.

Tabela 6- Teor de Carbono orgânico total (COT), Nitrogênio total (N) e fósforo total (P) dos substratos com doses crescentes de biossólido

| Avaliações | SB | Doses de biossólido no substrato | | | | |
|--------------------------------|-----------|---|-----------|------------|------------|------------|
| | | 0% | 5% | 10% | 15% | 30% |
| P total (g kg^{-1}) | 2,00 | 1,80 | 1,73 | 1,61 | 1,82 | 2,09 |
| COT (g kg^{-1}) | 389,0 | 264,1 | 395,1 | 282,3 | 358,6 | 230,4 |
| N total (g kg^{-1}) | 8,4 | 7,0 | 9,8 | 10,5 | 8,3 | 9,6 |
| C/N | 46/1 | 37/1 | 40/1 | 26/1 | 43/1 | 24/1 |

*P total: fósforo total; COT: carbono orgânico total; N total: nitrogênio total; C/N: relação carbono/nitrogênio

Fonte: elaborado pelo autor, 2024

Os maiores teores de fósforo total foram obtidos no substrato comercial (SB) com $2,0 \text{ g kg}^{-1}$ e nos tratamentos com 0, 15 e 30% de biossólido com valores de 1,80; 1,82 e $2,09 \text{ g kg}^{-1}$ de fósforo, respectivamente. Com base na tabela 6, observa-se que os substratos com menor dose de biossólido (0 e 5%) apresentaram teores de fósforo semelhantes aos tratamentos de maior dose (15 e 30%). Além disso, apesar do aumento do teor de fósforo observado na dose de 30% de biossólido, a variação entre tratamentos foi pequena.

Apesar do biossólido ser considerado uma boa fonte de nutrientes o pouco incremento do teor de fósforo aos substratos também foi observado por Kratz *et al.* (2013). Este comportamento pode estar relacionado a natureza do material e aos processos de tratamento empregados para obtenção do biossólido. Kratz *et al.* (2013) apresenta valores entre $0,2$ e $0,4 \text{ g kg}^{-1}$ como teores médios de fósforo em substratos e baixo inferiores a $0,2 \text{ g kg}^{-1}$. Os substratos utilizados apresentaram teores de fósforo quase 10 vezes superiores. Este

comportamento pode ser atribuído a proporção de cinzas utilizadas na composição dos substratos (Tabela 3) uma vez que este material tem sido considerado uma promissora fonte de fósforo como apontado por Arruda *et al.* (2016) e Fonseca & Hanisch (2018).

Em relação ao teor de nitrogênio presente nos substratos (Tabela 6), observa-se pouca variação em decorrência do aumento da dose de bioassólido quando avaliados os tratamentos em que este material foi adicionado. Contudo, quando comparados os tratamentos com bioassólido ao substrato com 0% de bioassólido é possível observar uma elevação de cerca de 3,0 g kg⁻¹ no teor de nitrogênio total. O aporte de nitrogênio observado pode estar relacionado ao maior teor de matéria orgânica no substrato condicionado pela presença do bioassólido e passível de avaliação pelo teor de carbono orgânico total (COT) apresentado na tabela 6.

Kratz *et al.* (2013) apontam o aumento da concentração de nitrogênio em substratos com a adição de bioassólido. Abreu *et al.* (2019) destacam que além de ser uma promissora fonte de nitrogênio, os bioassólidos, por apresentarem elevado teor de matéria orgânica, podem propiciar uma liberação mais lenta deste nutriente reduzindo as perdas por lixiviação e favorecendo seu aproveitamento.

A capacidade de liberação de nutrientes de forma mais lenta pode ser afirmada pela elevada relação C/N, superior a 30/1 na maioria dos tratamentos (Tabela 6). Os materiais a partir do qual os substratos são formulados apresentam diferentes relações C/N, fator este importante para a formulação de compostos capazes de reter e fornecer nutrientes de forma adequada ao crescimento das mudas (Jorge *et al.*, 2020). Além de nitrogênio e fósforo a utilização de materiais orgânicos em substratos pode proporcionar incremento no teor de outros macros e micronutrientes. Os substratos avaliados apresentaram comportamento variável em relação ao teor de nutrientes com o aumento da dose de bioassólido (tabela 7).

Tabela 7- Teor de elementos inorgânicos presentes nos substratos com doses crescentes de biossólido

| Elementos*** (g kg ⁻¹) | SB | Doses de biossólido no substrato | | | | | | % Recuperação** |
|---------------------------------------|------|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------------|
| | | 0% | 5% | 10% | 15% | 30% | | |
| K | 12,8 | 26,0 | 25,1 | 25,0 | 23,3 | 21,6 | 121,0 | |
| Ca | 15,2 | 38,4 | 41,9 | 43,7 | 48,6 | 56,2 | 146,6 | |
| Mg | 4,8 | 8,6 | 8,6 | 8,7 | 8,2 | 8,4 | 132,5 | |
| Cu | 0,14 | 0,34 | 0,34 | 0,34 | 0,33 | 0,31 | 138,5 | |
| Mn | 1,6 | 6,1 | 6,1 | 6,3 | 5,4 | 6,3 | 113,7 | |
| Fe | 74,5 | 152,1 | 144,9 | 145,5 | 136,4 | 126,6 | 139,3 | |
| Al | 64,6 | 107,1 | 110,8 | 110,8 | 111,9 | 118,6 | 125,9 | |
| Zn | 0,11 | 0,81 | 0,84 | 0,86 | 0,87 | 0,91 | 121,3 | |

*Dados obtidos por fluorescência de raio-x (FRX); ** %Recuperação obtida com base no teor de elementos presentes na amostra NIST 2709 A recuperados pelo equipamento.

***Al: alumínio; Ca: cálcio; Cu: cobre; Fe: ferro; K: Potássio; Mg: magnésio; Mn: manganês; Zn: zinco.

Fonte: elaborado pelo autor, 2024

O substrato comercial (SB) apresentou os menores de teores dos elementos analisados entre todos os tratamentos testados. Os substratos formulados apresentaram comportamentos variáveis em relação aos elementos com o aumento da dose de biossólido: elevação do teor cálcio (Ca), alumínio (Al) e zinco (Zn) e redução do teor de potássio (K) e ferro (Fe). Não houve grande alteração nos teores de manganês (Mn), magnésio (Mg) e cobre (Cu) (Tabela 7).

O aumento do teor de nutrientes em substrato com a adição de biossólido pode ser verificado nos trabalhos de Kratz *et al.* (2013); Kratz *et al.* (2017) e Abreu *et al.* (2017). No entanto, este pode ser variável em razão da natureza do material utilizado uma vez que materiais como estes tendem a possuir concentrações de nutrientes desbalanceadas.

Mesmo não sendo um nutriente o alumínio merece atenção na composição de substratos uma vez que sua presença pode causar toxidez as raízes inibindo seu desenvolvimento. No entanto, apesar do teor relativamente elevado de Al (Tabela 7) nos substratos (107, 1 g kg⁻¹ no substrato com 0% de biossólido a 118,6 g kg⁻¹ na dose de 30%)

não foram observados efeitos tóxicos sobre as raízes das mudas provavelmente devido ao elevado pH apresentado pelos substratos. Os valores elevados de pH (Tabela 5) sugerem que todo o alumínio presente deve estar complexado.

Formulações com diferentes tipos de materiais, como biossólidos e cinza, podem propiciar benefícios a produção de mudas reduzindo a necessidade de aplicação de fertilizantes minerais (Assenheimer, 2009; Sacramento et al., 2020; Piva, Brenner, Schmitt, 2024).

O teor de cálcio (Ca) nos substratos aumenta de 38,4 g kg⁻¹ no tratamento com biossólido a 56,2 g kg⁻¹ na dose de 30%, apresentando o dobro desse nutriente quando comparado ao substrato comercial (SB) com 15,2 g kg⁻¹. O teor de potássio, contudo, varia de 26,0 g kg⁻¹ na dose 0% a 21,6 g kg⁻¹ em 30%, 10 vezes mais que o SB com 12,8 g kg⁻¹. Já o magnésio (Mg) manteve-se em torno de 8,0 g kg⁻¹ nas formulações mesmo permanecendo superior ao SB (Tabela 7).

Os micronutrientes apresentaram comportamentos semelhantes (Tabela 7), inclusive em relação ao substrato comercial, o teor zinco (Zn) foi de 0,81 g kg⁻¹ no substrato com 0% de biossólido a 0,91 g kg⁻¹ na dose 30%, o ferro (Fe) de 152,1 a 126,6 g kg⁻¹ enquanto o cobre (Cu) permaneceu na concentração de 0,34 g kg⁻¹.

As exigências nutricionais de plantas variam de acordo com a espécie e idade de desenvolvimento. Dessa forma, apesar do elevado teor de nutrientes nos substratos a adubação mineral ainda pode ser necessária com o envelhecimento e desenvolvimento das mudas. Além disso, algumas espécies são mais exigentes em seu período inicial de desenvolvimento sendo necessária a utilização de adubação de base a fim de garantir um bom desempenho em viveiro.

Os benefícios da utilização de biossólidos como fonte de nutrientes para a produção de mudas florestais são destacados por Abreu *et al.* (2019). Os biossólidos em geral possuem alto teor de matéria orgânica e, consequentemente, carbono orgânico que promovem o aumento da CTC (capacidade de troca de cátions) resultando em uma melhor capacidade de armazenar e disponibilizar nutrientes às plantas. Ressalta ainda que o nitrogênio presente nestes materiais se encontra na forma orgânica sendo liberado com a degradação da matéria orgânica. Deste modo, o nitrogênio é liberado lentamente para o sistema reduzindo perdas por lixiviação e volatização. Os biossólidos possuem ainda elevados teores de fósforo em

formas menos recalcitrantes do que as encontradas no solo e em materiais tornando-os mais facilmente acessíveis.

As cinzas também desempenham papel importante na composição de substratos. As cinzas de biomassa vegetal, segundo Arruda et al. (2016), apresentam elevados teores de cálcio magnésio e potássio trocáveis capazes de suprir a necessidade das mudas produzidas. Além disso, estes nutrientes podem ser encontrados na forma de óxidos, hidróxidos e carbonatos capazes de elevar o pH. A elevação do pH favorece a disponibilidade de fósforo e micronutrientes e reduzir a toxidez por alumínio, pois o alumínio se torna menos solúvel em pH acima de 5,5. No entanto, valores de pH muito elevados (superiores a 7,0) como apresentado pelos substratos (Tabela 5) pode prejudicar a germinação das sementes e o desenvolvimento das mudas, devido a menor disponibilidade de micronutrientes essenciais, como Fe, Mn e Zn, e ao impacto negativo sobre a estrutura química e biológica do substrato (Kratz *et al.*, 2013; Bitencourt; Deknes; Laura, 2022).

2.3.1.4. Concentração de elementos traço nos substratos

Apesar dos resíduos como bioassólidos e cinzas serem materiais com elevado teor nutricional e de baixo custo tornando favorável sua utilização, Abreu et al. (2019) destacam a possibilidade de conterem concentrações elevadas de elementos traço. A tabela 8 apresenta os teores de elementos traço encontrados nos substratos utilizados.

Tabela 8 – Teor de elementos traço nos substratos com doses crescentes de biossólido e concentrações máximas permitidas pela CONAMA 498/2020

| Elementos (mg kg ⁻¹) | SB | Doses de biossólido no substrato | | | | | | Concentração máxima (mg kg ⁻¹) ST CONAMA 498 | |
|-------------------------------------|-------|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|------------------------|--|--|
| | | 0% | 5% | 10% | 15% | 30% | Biossólido Classe A | Biossólido Classe B | |
| | | | | | | | 41 | 75 | |
| As | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 7,6 | 15,1 | | | |
| Ba | -- | 80,0 | 80,0 | 80,0 | 90,0 | 90,0 | 1300 | 1300 | |
| Cd | 2,70 | 2,80 | 3,50 | 2,10 | 1,80 | 1,80 | 39 | 85 | |
| Cr | 68,4 | 143,7 | 136,8 | 109,5 | 116,3 | 150,5 | 1000 | 3000 | |
| Ni | 23,6 | 10,7 | 62,9 | 62,9 | 68,2 | 59,7 | 420 | 420 | |
| Pb | 27,8 | 55,7 | 65,0 | 55,7 | 64,9 | 55,7 | 300 | 840 | |
| Zn | 110,0 | 81,0 | 84,0 | 86,0 | 87,0 | 91,0 | 2800 | 7500 | |

*Dados obtidos por fluorescência de raio-x (FRX) com exceção do Cd; ** %Recuperação obtida com base no teor de elementos presentes na amostra NIST 2709 A recuperados pelo equipamento.

***Os elementos apresentaram as seguintes % de recuperação: Arsênio (As) 85,6%; bário (Ba) 91,0%; crômo (Cr) 68,4%; níquel (Ni) 116,0%, chumbo (Pb) 98,2% e zinco (Zn) 121,2%.

Fonte: elaborado pelo autor, 2024

A resolução Conama 498 de 2020 estipula os teores máximos permitidos de elementos traço nos biossólidos a serem utilizados na produção de espécies vegetais. Este limite é definido de acordo com a classe a qual o biossólido se enquadra (Classe A ou Classe B). A classe é determinada pelo tipo de material de origem do biossólido e o processo de estabilização a qual foi submetido. De acordo, com estes parâmetros são estipuladas as possibilidades de aplicação deste resíduo.

O biossólido utilizado na composição dos substratos pode ser classificado como pertencente a classe B estipulada pela Conama 498 (2020). Com base na tabela 8, pode se observar que apesar de haver uma tendência de elevação dos teores de elementos traço com aumento da dose de biossólido nos substratos, todos os tratamentos utilizados apresentaram concentrações inferiores aos limites máximos estipulados pela resolução Conama 498. Dessa forma, os substratos podem ser considerados viáveis para utilização na produção de mudas

florestais, contudo, para sua utilização como fertilizante e em outras culturas deve-se observar as diretrizes desta resolução.

O teor de chumbo (Pb) manteve-se semelhante entre os tratamentos com diferentes doses de bioSSólido com valor aproximado de 60,0 mg kg⁻¹, sendo superior ao encontrado no substrato comercial (SB) de 27,8 mg kg⁻¹. Comportamento semelhante pode ser observado para o zinco (Zn) embora este elemento esteja em menor quantidade nos substratos formulados (Tabela 8) quando comparados ao SB que possui o maior teor deste elemento (110,0 mg kg⁻¹).

O cromo (Cr) apresentou valores mais elevados nos tratamentos iniciais (0 e 5%) com teores de 143,7 e 136,8 mg kg⁻¹, reduzindo em seguida e voltando a apresentar elevação no substrato com 30% de bioSSólido com teor de 150,5 mg kg⁻¹ (Tabela 8), portanto, não apresentando diferenças entre eles. O teor de Cr nos substratos formulados também foi mais elevado ao obtido para o SB.

Por outro lado, o teor de Ni apresentou comportamento oposto ao do Cr, sendo os menores teores obtidos para o SB e o substrato com 0% de bioSSólido. Os demais tratamentos apresentaram elevação do teor de Ni com aumento da proporção de bioSSólido (5, 10 e 15%), voltando a apresentar redução na dose de 30% com 59,7 mg kg⁻¹ de Ni (Tabela 8). O teor de cádmio apresentou redução com o aumento da dose de bioSSólido nos substratos variando de 2,80 mg kg⁻¹ no tratamento com 0% de bioSSólido a 1,80 mg kg⁻¹ na dose de 30%, sendo inferior ao valor obtido para SB de 2,70 mg kg⁻¹.

Já o bário (Ba) e o arsênio (As) mantiveram-se estáveis nos substratos com 0, 5 e 10% de bioSSólido e no SB, elevando-se apenas nos tratamentos com 15 e 30% de bioSSólido. O Ba atingiu um teor de 90 mg kg⁻¹ nas duas formulações de substrato (15 e 30%) enquanto o As apresentou aumento significativo correspondente ao teor de bioSSólido empregado com os teores de 7,6 mg kg⁻¹ para a dose de 15% e 15,1 mg kg⁻¹ para o substrato com 30% de bioSSólido (Tabela 8).

2.3.2. Produção de mudas de *Eucalyptus grandis*

2.3.2.1. Avaliação da germinação e emergência

Os dados obtidos para germinação, mudas sobreviventes (MS), sementes mortas ou não germinadas (SM/NG) e dias até iniciar a emergência (DIE) variaram significativamente como pode ser observado na tabela 9.

Tabela 9- Avaliação da germinação e sobrevivência das mudas de *E. grandis*
obtidas em substratos com doses crescentes de bioassólido

| Propriedades | SB | Doses de bioassólido no substrato | | | | | | CV (%) |
|---------------------|-----------|--|-----------|------------|------------|------------|--|---------------|
| | | 0% | 5% | 10% | 15% | 30% | | |
| Germinação (%) | 96 a | 56 c | 82 ab | 56 c | 72 ab | 64 b | | 36,5 |
| MS (N) | 48 a | 28 b | 41 ab | 28 b | 36 ab | 32 ab | | 36,5 |
| SM/NG (N) | 2 a | 22 b | 9 ab | 22 b | 14 ab | 18 b | | 89,3 |
| DIE (dias) | 9,0 a | 9,8 a | 9,4 a | 9,2 a | 8,3 a | 9,4 a | | 19,6 |

*Médias seguidas da mesma letra, na linha, não apresentam diferenças significativas pelo teste de Tukey a 5% de significância.

**MS: mudas sobreviventes; SM/NG: sementes mortas ou não germinadas; DIE: dias até iniciar a

Fonte: elaborado pelo autor

A germinação apresentou uma tendência de redução com o aumento do teor de bioassólido (Tabela 9) variando de 96% no substrato comercial (SB) a 64% no substrato com 30% de bioassólido. Os menores valores de germinação foram obtidos nos substratos com 0 e 10% de bioassólido, ambos com 56%.

O número de mudas sobreviventes foi maior no SB (48) e menor nos substratos com 0 e 10% de bioassólido (ambos com 28 unidades). Os substratos com maior teor de bioassólido (15 e 30%) resultaram em 36 e 32 mudas sobreviventes, respectivamente. Comportamento inverso foi observado em relação as sementes mortas ou não germinadas (SM/NG) sendo o menor valor obtido pelo SB (2) e o maior valore pelos substratos com 0 e 10% de bioassólido (Tabela 9). Contudo, os dias até iniciar emergência (DIE) apresentaram pouca variação entre os tratamentos, variando de 9,0 no SB a 9,4 dias no substrato com 30% de bioassólido. O menor DIE foi obtido pelo substrato com 155 de bioassólido com 8,3.

A redução na germinação no substrato com 0% de biocarvão pode ser resultado da menor retenção de água devido a maior proporção de macroporos na formulação que favorece a perda de água, reduzindo a capacidade de embebição das sementes. O DIE não apresentou diferença significativa entre os tratamentos com uma média de 9 dias, contudo o substrato com 15% de bioassólido destaca-se por apresentar a menor média com 8,3 dias. Este comportamento pode ser resultado da maior capacidade de retenção de água que essa formulação possui em relação aos tratamentos com doses menores de bioassólido. Já quando se considera o substrato com 30% de bioassólido, o menor DIE apresentado pela formulação de 15% pode ser resultado do maior equilíbrio entre ar e água no substrato.

No entanto, ressalta-se que estes resultados foram obtidos em ensaio em paralelo com menor tempo de duração e redução campo amostral. Destaca-se que no experimento conduzido para avaliação das mudas os substratos com 5, 10 e 15% de bioassólido obtiveram maior número de mudas ao fim do período de crescimento (40, 47 e 45, respectivamente).

O substrato comercial (SB) e os substratos com 0 e 30% de bioassólido resultaram em 37, 39 e 39 mudas, respectivamente. Este comportamento pode ser explicado em virtude das propriedades físicas (Tabela 4) apresentadas por estes tratamentos uma vez que o tratamento com 0% de bioassólido pode ter favorecido a perda de água. O SB e o substrato com 30% de bioassólido podem ter apresentado compactação uma vez que tal processo é favorecido por densidade altas como as exibidas por estes tratamentos (Tabela 4). O SB utilizado destacou-se pela observação visual de extrema rigidez ao fim do experimento.

2.3.2.2. Parâmetros morfológicos

As mudas apresentaram desempenho similar em relação as variáveis analisadas de acordo com os tratamentos. Os substratos com maiores doses de bioassólido (15 e 30%) obtiveram os melhores resultados para todos os parâmetros avaliados, destacando-se entre os tratamentos. A tabela 10 apresenta os valores obtidos para altura (H) e diâmetro do coleto (DC).

Tabela 10- Parâmetros morfológicos estruturais altura e diâmetro à altura do coleto (DC) das mudas de *E. grandis* obtidas em substratos com doses crescentes de biofertilizante

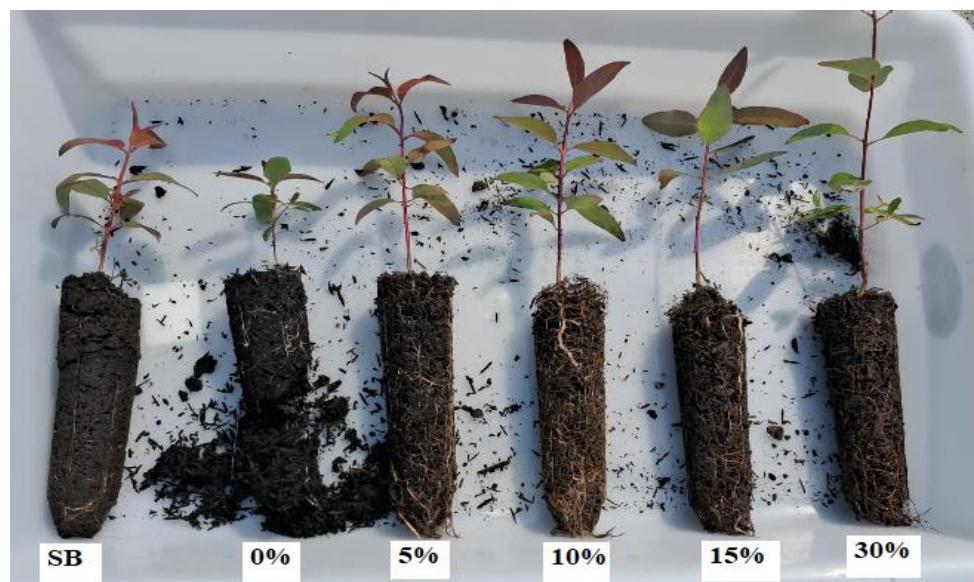
| Propriedades | SB | Doses de biofertilizante no substrato | | | | | | CV (%) |
|---------------------|-----------|--|-----------|------------|------------|------------|--|---------------|
| | | 0% | 5% | 10% | 15% | 30% | | |
| Altura (cm) | 5,3 c | 7,1 b | 6,7 b | 7,0 b | 11,5 a | 12,2 a | | 47,2 |
| DC (mm) | 0,84 b | 0,94 b | 0,92 b | 1,01 b | 1,35 a | 1,36 a | | 36,5 |

*Médias seguidas da mesma letra, na linha, não apresentam diferença significativa pelo teste de Tukey a 5% de significância; **DC: diâmetro à altura do coleto.

Fonte: elaborado pelo autor, 2024.

Os valores obtidos para altura (H) e diâmetro (DC) apresentaram comportamento similar. Os tratamentos com 15 e 30% possuem os maiores valores para altura e diâmetro do coleto, sendo 11,5 cm de H e 1,35 mm de DC com 15% de biofertilizante e 12,2 cm e 1,36 mm com 30%. Os demais tratamentos (0, 5 e 10% de biofertilizante) demonstraram menor crescimento (Tabela 10). Dentre estes os melhores resultados foram obtidos para o substrato com 0% de biofertilizante. A figura 3 possibilita a visualização das mudas obtidas.

Figura 3- Mudas de *Eucalyptus grandis* desenvolvidas em substratos com doses crescentes de biofertilizante



Fonte: elaborado pelo autor, 2024.

Recomenda-se como padrão para mudas de *Eucalyptus* spp. aptas ao plantio uma altura de parte aérea entre 15 e 25 cm e de diâmetro de coleto superior a 2 mm (Wendling, 2014; Araujo *et al.*, 2018). Entre as médias obtidas para os tratamentos, nenhum obteve valores de altura e diâmetro de coleto consideráveis aptas a plantio provavelmente devido a falta de suplementação nutricional, uma vez que plantas de *Eucalyptus* spp. possuem uma demanda elevada no período inicial de desenvolvimento (Tabela 10). Contudo, ressalta-se que os substratos com 15 e 30% foram os tratamentos que obtiveram resultados mais próximos a este intervalo.

Além disso, todos os substratos formulados apresentaram melhor desempenho que o substrato comercial (SB) (Tabela 10). Este comportamento, contudo, pode ser explicado pela não realização da adubação de base, pois substratos comerciais em geral possuem baixos teores de nutrientes e plantas como o eucalipto podem apresentar alta exigência nutricional na fase inicial de desenvolvimento. Os teores de nutrientes presentes no substrato comercial podem ser observados nas tabelas 6 e 7.

Os dados referentes a biomassa acumulada pelas mudas podem ser observada na tabela 11. De forma geral, os melhores resultados foram obtidas pelos substratos com 15 e 30% de bioassólido.

Tabela 11- Avaliação da biomassa das mudas das *E. grandis* obtidas em substratos com doses crescentes de bioassólido

| Propriedades | SB | Doses de bioassólido no substrato | | | | | | CV (%) |
|---------------------|-----------|--|-----------|------------|------------|------------|------|---------------|
| | | 0% | 5% | 10% | 15% | 30% | | |
| MF total (g) | 1,01 d | 2,15 bc | 1, 66 c | 2,11 bc | 2,76 ab | 3,08 a | 56,2 | |
| MFPA (g) | 0,33 d | 0,64 b | 0,41 cd | 0,52 bc | 0,88 a | 1,16 a | 69,0 | |
| MSPA (g) | 0,09 c | 0,19 b | 0,14 bc | 0,18 b | 0,31 a | 0,38 a | 74,1 | |
| MFR (g) | 0,67 c | 1,44 ab | 1,22 b | 1, 46 ab | 1,78 a | 1, 83 a | 57,2 | |
| MSR (g) | 0,05 c | 0,11 ab | 0,09 b | 0,10 ab | 0,17 a | 0,18 a | 68,9 | |
| MS total (g) | 0,14 c | 0,30 b | 0,23 b | 0,28 b | 0,48 a | 0,56 a | 69,6 | |

*Médias seguidas da mesma letra, em linha, não possuem diferença significativa pelo teste de Tukey a 5% de significância; **MF: total: massa fresca total; MFPA: massa fresca da parte aérea; MSPA: massa seca da parte aérea; MFR: massa fresca de raiz; MSR: massa seca de raiz; MS total: massa seca total.

Fonte: elaborado pelo autor, 2024.

O substrato comercial (SB) apresentou os menores valores de biomassa para todas as variáveis analisadas. De forma geral, observou-se redução dos valores de biomassa do substrato com 0% de biossólido para o substrato com 5%, seguido de elevação dos dados obtidos com aumento da dose de biossólido. Em relação a massa fresca total (MF total), massa seca total (MS total), massa fresca e massa seca da parte aérea (MFPA e MSPA) os substratos com 15 e 30% obtiveram os melhores resultados (Tabela 11).

A MF total variou de 2,15 g no substrato com 0% de biossólido a 3,08 g com 30% do material. A MFPA foi de 0,64 g na dose 0% a 1,16 g em 30%. A MSPA variou de 0,19 g a 0,38 g, enquanto a MS total foi de 0,30 g a 0,56 g entre os substratos com 0 e 30% de biossólido. A MFR foi de 1,44 g no substrato com 0% de biossólido a 1,83 g no tratamento com 30%. Enquanto a MSR variou de 0,11 g a 0,18% nos mesmos tratamentos. Em relação a massa fresca e massa seca de raiz (MFR e MSR) apesar dos substratos com 15 e 30% de biossólido possuírem os melhores resultados para estas variáveis, os tratamentos com 0 e 10% de biossólido apresentaram comportamento similar, evidenciado pela análise estatística (Tabela 11).

Pode-se observar que os substratos com 15 e 30% de biossólido obtiveram maior acúmulo de biomassa dentre os tratamentos. Além disso, a raiz apresentou maiores valores que a parte aérea, tanto para massa fresca quanto massa seca, evidenciando um melhor desenvolvimento do sistema radicular (Tabela 12).

Tabela 12- Atributos radiculares comprimento de raiz (CR), diâmetro de raiz (DR), área de projeção de raízes (APS), área superficial de raízes (ASR) e volume ocupado pelas raízes (VR) das mudas de *E. grandis* obtidas em substratos com doses crescentes de bioassólido

| Propriedades | SB | Doses de bioassólido no substrato | | | | | | CV (%) |
|------------------------|-----------|--|-----------|------------|------------|------------|------|---------------|
| | | 0% | 5% | 10% | 15% | 30% | | |
| CR (cm) | 2039 c | 3029 b | 2899 b | 3538 ab | 4421 a | 4051 a | 45,7 | |
| DR (mm) | 0,66 d | 0,72 bc | 0,69 cd | 0,72 cd | 0,77 ab | 0,80 a | 15,3 | |
| APR (cm ²) | 143,9 c | 258,0 b | 240,8b | 281,1 ab | 341,4 a | 333,5 a | 45,8 | |
| ASR (cm ²) | 437,6 c | 810,4 b | 756,4b | 883,5 ab | 1072,5 a | 1047,6 a | 46,4 | |
| VR (cm ³) | 0,76 c | 1,53 b | 1,37 b | 1,64 ab | 2,12 a | 2,20 a | 57,8 | |

*Médias seguidas pela mesma letra, na linha, não diferem pelo teste de Dunn para CR e pelo teste de Tukey para as demais variáveis, a 5% de significância; **CR: comprimento de raiz; DR: diâmetro de raiz; APR: área de projeção das raízes; ASR: área superficial de raízes; VR: volume ocupado pelas raízes.

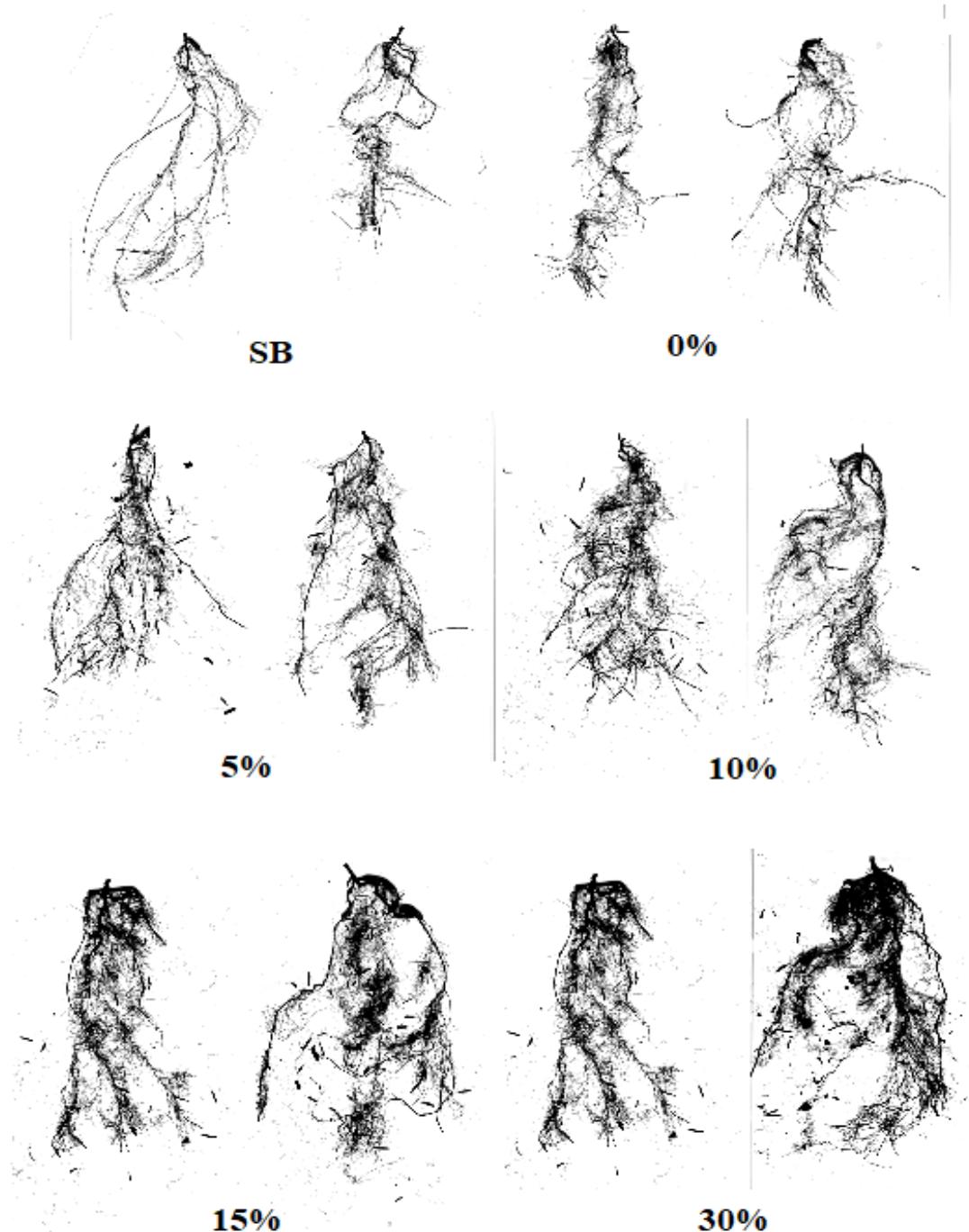
Fonte: elaborado pelo autor, 2024.

Os atributos radiculares avaliados apresentaram comportamento similar aos demais parâmetros morfológicos analisados com redução de crescimento no substrato com 5% de bioassólido e aumento das médias obtidas a partir da dose de 10% de bioassólido (Tabela 10, 11 e 12). Os substratos com 15 e 30% de bioassólido mantiveram-se em destaque exibindo os melhores resultados (Tabela 12). Contudo, para os atributos radiculares, o substrato com 10% de bioassólido obteve desempenho semelhante a eles, porém com médias inferiores. Além disso, todos os substratos formulados obtiveram melhor desempenho que o substrato comercial.

O comprimento de raiz (cm) variou de 3029 cm no substrato com 0% de bioassólido a 4051 na dose de 30%, contudo o melhor resultado foi obtido pelo tratamento com 15% de bioassólido com 4421 cm. Já o diâmetro de raiz (DR) apresentou menor variação com 0.72 mm na dose 0% e 0,80 em 30% (Tabela 12). Em relação a capacidade de exploração das raízes a maior área de projeção das raízes (APR) foi obtida pelo tratamento com 15% de bioassólido (341,4 cm²), variando de 258,0 cm² na dose 0% a 333,5 cm² em 30%. A área superficial de raízes (ASR) exibiu o mesmo comportamento com o substrato com 15% obtendo o melhor desempenho (1072,5 cm) e variação de 810,4 a 1047,6 cm do substrato

com 0% de bioassolido a 30% (Tabela 12). O volume ocupado pelas raízes (VR) foi de 1,53 cm³ no substrato com 0% de bioassolido a 2,20 cm³ em 30%, sendo que este o melhor resultado obtido (Tabela 12). Os aspectos morfológicos das raízes podem ser visualizados na figura 4.

Figura 4- Imagens das raízes de *E. grandis* desenvolvidas em substratos com doses crescentes de bioassolido obtidas pelo programa WhinRhizo



Fonte: elaborado pelo autor, 2024.

Com base na figura 4, observa-se que houve variação no desenvolvimento das raízes com o aumento das doses de biossólido utilizada. Os tratamentos contendo biossólido apresentam melhor aspecto visual das raízes comparados ao substrato comercial (SB) e ao substrato com 0% de biossólido. Embora os tratamentos com biossólido (5, 10, 15 e 30%) demonstrem aspectos radiculares similares, os substratos com 15 e 30% de biossólido mantiveram maior homogeneidade quanto ao desenvolvimento de raízes.

O melhor desenvolvimento das mudas de *Eucalyptus grandis* pode estar relacionado as melhores condições físicas proporcionadas pelos substratos e aos nutrientes fornecidos pelos substratos formulados mediante a adição de biossólido e cinzas (Tabela 3). Contudo, salienta-se que a complementação nutricional com outros fertilizantes pode ser necessária, principalmente no início do período de crescimento mediante a exigência da espécie utilizada.

Os biossólidos, em geral, tem a capacidade de fornecer nutrientes como fósforo, cálcio e principalmente nitrogênio, de forma mais lenta favorecendo seu aproveitamento (Trigueiro; Guerrini, 2003; Ibrahim *et al.*, 2014; Abreu *et al.*, 2019; Sperotto; Doll; Homczinski, 2023). Enquanto as cinzas de biomassa podem fornecer quantidades favoráveis de potássio e fósforo (Arruda *et al.*, 2016; Fonseca; Hanisch, 2018). Nascentes *et al.* (2019) e Sperotto; Doll; Homczinski (2023) realizaram trabalhos de revisão bibliográfica a fim de avaliar o uso de lodo de esgoto como fertilizante em plantios florestais, principalmente do gênero *Eucalyptus*. Estes autores apontam o incremento de biomassa das espécies vegetais resultando em um melhor desenvolvimento e maior rendimento de madeira.

Os autores ainda apontam a capacidade de biossólidos em suprir parcial ou completamente a demanda de nutrientes nas áreas de plantios florestais destacando a importância da possibilidade de redução do uso de adubos minerais como uma forma de tornar a atividade florestal menos onerosa. Além disso, ambos os autores afirmam que apesar de possuírem metais pesados em sua constituição, os trabalhos realizados com este tipo de material não demonstraram elevação do risco de contaminação dos solos. Comportamento este corroborado pela quantificação dos teores de metais pesados nos solos em que o biossólido foi aplicado e pela realização de ensaios ecotoxicológicos, ambos com respostas favoráveis a utilização deste tipo de material.

2.3.2.3. Índices de qualidade

Os índices utilizados para avaliar a qualidade de mudas florestais obtiveram resultados divergentes para os substratos avaliados (Tabela 13).

Tabela 13- Índices de qualidade para as mudas de *E. grandis* obtidas em substratos com doses crescentes de biofertilizante- Relação altura diâmetro a altura do coleto (RHDC), Relação altura massa seca da parte aérea (RHMSPA) e índice de qualidade de Dickson (IQD)

| Avaliações | Doses de biofertilizante no substrato | | | | | |
|-------------------|--|-----------|-----------|------------|------------|------------|
| | SB | 0% | 5% | 10% | 15% | 30% |
| RHDC | 6,35 c | 7,71 b | 7,75 b | 7,23 b | 8,58 a | 8,96 a |
| RHMSPA | 74,54 a | 53,57 ab | 61,16 b | 46,75 bc | 39,75 c | 39,48 c |
| IDQ | 0,02 bc | 0,03 b | 0,03 b | 0,03 b | 0,05 a | 0,05 a |

*Médias seguidas da mesma letra, na linha, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de significância; **RHDC: relação altura/diâmetro a altura do coleto; RHMSPA: relação altura massa seca parte aérea; IDQ: índice de qualidade de Dickson.

Fonte: elaborado pelo autor, 2024

A relação altura/diâmetro de coleto (RHDC) apresentou elevação com o aumento da dose de biofertilizante no substrato, variando de 7,71 no substrato com 0% de biofertilizante a 8,96 no tratamento com 30%. O substrato comercial (SB) obteve o menor RHDC com valor de 6,35. A relação altura/massa seca da parte aérea (RHMSPA) exibiu comportamento contrário ao RHDC, obtendo valores de 53,57 com 0% de biofertilizante e 39,48 em 30%. O SB obteve o maior valor de RHMSPA de 74,54. O índice de qualidade de Dickson (IDQ), por outro lado, apresentou comportamento similar ao RHDC com elevação de acordo com o aumento da dose de biofertilizante utilizado. Os valores de IDQ foram de 0,03 no substrato com 0% de biofertilizante a 0,05 no tratamento com 30%, enquanto o SB obteve o menor valor de 0,02 (Tabela 13).

Os índices calculados com base nos parâmetros morfológicos das mudas florestais podem ser utilizados para determinar a qualidade dessas mudas e sua capacidade de sobrevivência à campo. Ao considerar a robustez e o equilíbrio da distribuição de biomassa

nas mudas estes índices podem sugerir uma avaliação mais confiável dos indivíduos quando comparados aos parâmetros morfológicos isoladamente (Rudeck; Garcia; Peres, 2013). Segundo abordado por Rudeck; Garcia; Peres (2013), pesquisas anteriores apontam valores de RHDC entre 7,7 e 10,44 como adequados para mudas de *Eucalyptus grandis* com cerca de 115 dias após a emergência. Araujo *et al.* (2018) apontam valores de RHDC entre 7,1 e 11,9 para *Eucalyptus* spp. As mudas obtidas nos substratos formulados (Tabela 3) apresentaram valores de RHDC dentro do intervalo considerado adequado. Somente o substrato comercial (SB) exibiu RHDC inferior ao intervalo (Tabela 13).

A literatura sugere que valores de RHMSPA inferiores a 8 indicam mudas mais robustas com melhor distribuição entre altura e biomassa acumulada na parte aérea. RHMSPA superiores a 12, contudo, sugerem mudas com altura excessiva em relação a biomassa podendo comprometer sua capacidade de sobrevivências à campo (Gomes *et al.*, 2012). De acordo com os dados obtidos para RHMSPA (Tabela 13) todos os tratamentos testados podem apresentar problemas de sobrevivência a campo em virtude do alto valores de RHMSPA que variaram de 53,57 no substrato com 0% de bioassólido a 39,48 na dose de 30%. O maior valor foi obtido no substrato comercial SB com 74,54.

Apesar dos valores excederem os limites de referência em todos os tratamentos, valores menores de RHMSPA podem ser observados nos substratos com 15 e 30% de bioassólido sugerindo que estes apresentaram melhor desenvolvimento de biomassa em relação a altura. Deste modo, aponta-se possibilidade de maior sobrevivência das mudas desses tratamentos comparados aos demais. Estes índices são amplamente utilizados para a avaliação da qualidade de mudas em viveiro devido a maior simplicidade, principalmente o RHDC por permitir a realização da avaliação sem a destruição das plantas. No entanto, Gomes *et al.* (2002) apontam a fragilidade destes parâmetros uma vez que se baseiam apenas em medidas de parte aérea, desconsiderando o sistema radicular.

O índice de qualidade de Dickson (IQD) é amplamente utilizado para avaliação da qualidade de mudas possuindo como vantagem a capacidade de avaliar não só a parte aérea como o sistema radicular (Araujo *et al.*, 2018). O IQD pode ser considerado mais fidedigno ao avaliar a qualidade das mudas pois além de avaliar o crescimento permite relacionar o acúmulo de biomassa a partir da fotossíntese (Costa; Almeida; Castro, 2020). Os valores de IQD variam de acordo com a espécie vegetal, condições de manejo durante o desenvolvimento e idade da planta, mas, de forma geral, recomenda-se um valor entre 0,2 e

10. Comparativamente, valores de IQD maiores indicam mudas de maior qualidade e com maior potencial de sobrevivência à campo (Costa; Almeida; Castro, 2020).

Os dados de IQD obtidos para os tratamentos foram inferiores aos valores considerados adequados (Tabela 13). Isto não inviabiliza a utilização das mudas, porém pode indicar que as mudas foram retiradas em estágio muito jovem sendo necessário um maior tempo para o seu desenvolvimento. Apesar disto, os substratos com 15 e 30% de biofertilizante apresentaram os melhores valores de IQD, comparados aos demais tratamentos, evidenciando a maior qualidade das mudas a partir de seu melhor desenvolvimento.

2.4. CONCLUSÃO

A utilização de biofertilizante da indústria papeleira e cinza de biomassa da indústria de geração de energia em formulações de substrato proporciona condições físicas e químicas consideradas adequadas a produção de mudas. Materiais como biofertilizantes e cinzas possuem elementos traço em suas composições, contudo a utilização destes materiais na formulação de substratos para produção de mudas não apresentou efeitos tóxicos significativos às mudas de *Eucalyptus grandis*. Além disso, apesar de aumentarem o teor desses elementos nos substratos, estes mantiveram-se inferiores aos limites estabelecidos pela legislação pertinente.

Os substratos com doses de 15 e 30% de biofertilizante apresentaram melhor desempenho em todas as variáveis morfológicas avaliadas: altura, diâmetro de coleto, massa fresca e massa seca total, massa fresca e seca da parte aérea, massa fresca e seca de raiz, comprimento e diâmetro de raiz, área de projeção, área superficial e volume ocupado pelas raízes. Os substratos com 15 e 30% de biofertilizante apresentaram melhores valores de RHMSPA e IQD. Os substratos formulados com biofertilizante obtiveram resultados adequados de RHDC. Não forma observados efeitos negativos significantes no desenvolvimento de mudas de *Eucalyptus grandis* com aumento da dose de biofertilizante utilizado.

Dessa forma, pode-se afirmar que o biofertilizante da indústria papeleira e as cinzas da indústria de geração de energia podem ser utilizadas em formulações de substratos para produção de mudas de eucalipto. Recomenda-se ainda a utilização das doses de 15 e 30% de biofertilizante a fim de obterem-se mudas de *E. grandis* com maior qualidade. Além disso, ressalta-se que pode ser necessário realizar adubação complementar.

2.5. REFERÊNCIAS

ABREU, Alan Henrique Marques de; ALONSO, Jorge Makhlouta; MELO, Lucas Amaral de; LELES, Paulo Sérgio dos Santos; SANTOS, Gabriel Rocha dos. Caracterização de biossólido e potencial de uso na produção de mudas de *Schinus terebinthifolia* Raddi. **Eng. Sanit. Ambient.**, v. 24, n. 3, p. 591-599, maio/jun, 2019. DOI: 10.1590/S1413-41522019108265

ARAUJO, Maristela Machado; NAVROSKI, Marcio Carlos; SCHORN, Lauri Amândio; TABALDI, Luciane Almeri; RORATO, Daniele Guarienti; TURCHETTO, Felipe; ZAVISTANOVICZ, Thairini Claudino; BERGHETTI, Álvaro Luís Pasquetti; AIMI, Suelen Carpenedo; TONETTO, Thaíse da Silva; GASPARIN, Ezequiel; KELLING, Mônica Brucker; ÁVILA, Angela Luciana de; DUTRA, Adriana Falcão; MEZZOMO, Jessé Calletti; GOMES, Daniele Rodrigues; GRIEBELER, Adriana Maria; SILVA, Matheus Roberto da; BARBOSA, Felipe Manzoni; LIMA, Marllos Santos de. Caracterização e análise de atributos morfológicos e fisiológicos indicadores de qualidade de mudas em viveiro florestal (Capítulo 16). In: ARAUJO, Maristela Machado; NAVROSKI, Marcio Carlos; SCHORN, Lauri Amândio. **Produção de sementes e mudas:** em enfoque à silvicultura. Ed. UFSM, Santa Maria, RS, p.345-366, 2018.

ARRUDA, Janelison Alves de; AZEVEDO, Thiago Anderson Oliveira de; FREIRE, Lucínio de Oliveira; BANDEIRA, Lucas Bochartt; ESTRELA, José Wellington de Medeiros; SANTOS, Sebastiana Joelma de Azevedo. Uso de cinza de biomassa na agricultura: efeitos sobre atributos do solo e resposta das culturas. **Revista principia**, n. 30, João Pessoa, PB, 2016. DOI: 10.18265/1517-03062015v1n30p18-30

ASSENHEIMER, Adriane. Benefícios do uso de biossólidos como substratos na produção de mudas de espécies florestais. **Revista Ambiência**, v. 5, n. 2, Guarapuava, PR, p. 321-330, maio/ago., 2009. Disponível em:

<https://revistas.unicentro.br/index.php/ambiciencia/article/view/345/pdf>

BELLOTE, Antonio Francisco Jurado; SILVA, Helton Damin da; FERREIRA, Carlos Alberto; ANDRADE, Guilherme de Castro. Resíduos da indústria de celulose em plantios florestais. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 37, p. 99-106, jul./dez., 1998.

Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPF-2009-09/4958/1/abellote.pdf>

BITENCOURT, Gislayne de Araujo; DEKNES, Luzia; LAURA, Valdemir. Crescimento de mudas dde eucalipto em solo com aplicação de lodo de curtume. **Scientia Plena**, v. 18, n. 3, abril, 2022. DOI: 10.14808/sci.plena.2022.034901

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 498, de 19 de agosto de 2020.** Dispõe sobre critérios e procedimentos para a produção e aplicação de bioassólidos em solos e dá outras providências. *Diário Oficial da União: seção 1*, Brasília, DF, 21 ago. 2020. Disponível em: . Acesso em: 20 nov 2024.

BRASIL. **Manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes e corretivos.** Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento- MAPA. Secretaria de Defesa Agropecuária, Brasília, DF, 240 p., 2017.

BRAND, Martha Andreia; HENNE, Reny Aldo; SCHEIN, Viviane Aparecida Spinelli; PEREIRA, Ederson Rodrigues. Mapeamento dos problemas associados à geração e tratamento das cinzas na combustão da biomassa florestal em caldeira. **Ciência Florestal**, v. 31, n.3, Santa Maria, RS, p. 1167-1192, jul/set, 2021. DOI: <http://doi.org/10.5902/1980509835819>

CAVALCANTE LOPES, Betel. **Uso de biocarvão em sistema de produção de mudas.** 2024. Tese (Doutorado em Ciência do Solo)- Centro de Ciências Agroveterinárias, Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2024.

COSTA, Cristiano Cunha; ALMEIDA, Luís Eduardo; CASTRO, Vinícius Resende de. Evaluation of the morphological parameters of native species of the Atlantic Forest in biodegradable tubes. **Revista Ambientale**, Universidade Estadual de Alagoas/UNEAL, v. 12, n. 4, p. 44-54, out-dez, 2020. DOI: <https://doi.org/10.48180/ambientale.v12i4.246>

COSTA, Mirian Cristina Gomes; TONINI, Helio; SCHWENGBER, Julio Augusto Melo. **Aspectos sobre nutrição e adubação do eucalipto-** Fundamentos para pesquisas em Roraima. Documentos 03, Embrapa Roraima, Boa vista, RR, 29 p., 2008.

COUTINHO, Tatiane Barros; JARDIM, Rodrigo Coutinho. Resíduos sólidos industriais do processo de fabricação de celulose. ***Eucalyptus Online Book***, 2014. Disponível em: https://www.eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT20_LODOS.pdf.

ELOY, Elder; CARON, Braulio Otomar; TREVISAN, Rômulo; BEHLING, Alexandre; SCHMIDT, Denise; SOUZA, Velci Queiróz de. Determinação do período de permanência de mudas de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maid. em casa de vegetação. **Comunicata Scientiae**, v. 5, n. 1, p.44-50, 2014. DOI:

<https://doi.org/10.14295/cs.v5i1.270>

FERMINO, Maria Helena; MIETH, Patrícia. Análise de substratos para produção de mudas de espécies florestais (Capítulo 8). In: ARAUJO, Maristela Machado; NAVROSKI, Marcio Carlos; SCHORN, Lauri Amândio. **Produção de sementes e mudas**: em enfoque à silvicultura. Ed. UFSM, Santa Maria, RS, p. 167-186, 2018.

FOELKEL, Celso. **Aplicações da biotecnologia em processos ambientais da fabricação de celulose, Kraft e de papel de eucalipto**: processos aeróbicos por lodos ativados para tratamento de efluentes. Eucalyptus Online Book, Capítulo 34, março de 2014. Disponível em: https://www.eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT34_Lodos_Ativados.pdf.pdf

FONSECA, José Alfredo; HANISCH, Ana Lúcia. Cinza de biomassa é um produto eficiente para uso em sistema de produção de cereais em base agroecológica? **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 17, n. 4, UDESC, 2018

FREDDI, Letícia Amadeu. Riscos associados à aplicação de lodo de esgoto na agricultura. **Revista Científica ANAP Brasil**, v.12, n. 24, 2019.
DOI: <https://doi.org/10.17271/19843240122420191982>

GIORDANO, Gandhi et al. Tratamento e controle de efluentes industriais. **Revista ABES**, v. 4, n. 76, p. 1-84, 2004.

GOMES, José Mauro; COUTO, Laércio; LEITE, Helio Garcia; XAVIER, Aloisio; GARCIA, Silvana Lages Ribeiro. Parâmetro morfológicos na avaliação da qualidade de mudas de *Eucalyptus grandis*. **R. Árvore**, v. 26, n. 6, Viçosa, MG, p. 655-664, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622002000600002>

GONÇALVES, José Leonardo de Moraes. Recomendações de adubação para *Eucalyptus*, *Pinus* e espécies típicas da Mata Atlântica. **Documento Florestais**, v. 15, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, p. 1-23, 1995.

GUERRINI, Iraê Amaral; TRIGUEIRO, Rodrigo de Menezes. Atributos físicos e químicos de substratos compostos por bioassólidos e casca de arroz carbonizada. **R. Bras. Ci. Solo**, n. 28, p. 1069-1076, 2004.

HANSTED, Ana Larissa Santiago; HANSTED, Felipe Augusto Santiago; SILVA, José Mauro Santana da; YAMAJI, Flávio Minoru; COSTA, Vladimir Eliodoro. Industrial waste from biomass boiler: Ash as a liming replacement for eucalyptus planting in Brazil. **Industrial Crops & Products**, v. 202, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117104>

IBÁ – INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório anual 2023**. São Paulo: IBÁ, 2023. Disponível em: <https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2023-r.pdf>. Acesso em: out. 2024.

IBRAHIM, João Felipe de Oliveira Nunes; SILVA JUNIOR, Irineu Vieira; BARROS, Fabiana da Costa; PAEZ, Doris Rakel Monteiro; NASCENTES, Alexandre Lioi; SILVA, Leonardo Duarte Batista da. Utilização de lodo de esgoto na produção de mudas e m o cultivo de eucalipto (*Eucalyptus* spp.). **Braz. J. Anim. Environ. Res.**, Curitiba, v. 2, n. 1, p. 564-579, jan./mar. 2019. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BJAER/article/view/1442>

JORGE, Marçal Henrique Amici; CASTRO E MELO, Raphael Augusto de; RESENDE, Francisco Vilela; COSTA, Edilson; SILVA, Juscimar da; GUEDES, Italo Moraes Rocha. **Informações técnicas sobre substratos utilizados na produção de mudas de hortaliças**. Documentos 180, Embrapa Hortaliças, Brasília, DF, 30 p., 2020.

KLABIN. **Estação de Tratamento de Efluentes (ETE)**. Banco de dados GRU-Recuperação. Klabin, Unidade Otacílio Costa, SC, [s.d].

KRATZ, Dagma; WENDLING, Ivar; NOGUEIRA, Antonio Carlos; SOUZA, Paulo Vitor de. Propriedades físicas e químicas de substratos renováveis. **Revista Árvore**, v. 37, n. 6,

Viçosa, MG, p. 1103-1113, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622013000600012>

KRATZ, Dagma; NOGUEIRA, Antonio Carlos; WENDLING, Ivar; MELLEK, José Elias. Physic-chemical Properties and substrate formulation for *Eucalyptus* seedlings production. *Sci. For.*, v. 45, n. 113, Piracicaba, SP, p. 63-76, mar., 2017. DOI: [dx.doi.org/10.18671/scifor.45n113.06](https://doi.org/10.18671/scifor.45n113.06)

MAEDA, Shizuo; DEDECEK, Renato Antonio; AGOSTINI, Raul Bortolotto; ANDRADE, Guilherme de Castro; SILVA, Helton Damin da. Caracterização de substratos para produção de mudas de espécies florestais a partir de resíduos orgânicos. *Pesq. Flor. Bras.*, Colombo, n. 54, p. 97-104, jan./jun, 2007. Disponível em: <https://pfb.cnpf.embrapa.br/pfb/index.php/pfb/article/view/133>.

MAEDA, Shizuo; COSTA, Epitágoras Rodson Oliveira; SILVA, Helton Damin da. **Uso de resíduos da fabricação de celulose e papel e da reciclagem de papel**. Documentos 202, Embrapa Florestas (recurso eletrônico), Colombo, PR, 50 p., 2010.

MARTIN-NETO, Ladislau; ANDRADE, Cristiano Alberto de (edt.). **Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropical e subtropical**. Embrapa Meio Ambiente, Brasília, DF, p. 507-530, 2023.

NASCENTES, Alexandre Lioi; LENA, Bruno Patias; FRANCISCO, João Paulo; BARROS, Fabiano da Costa; SILVA, Leonardo Duarte Batista. Utilização do lodo de esgoto para produção comercial e mudas de eucalipto. *Applied Research & Agrotechnology*, v. 12, n. 3, Guarapuava, PR, p. 151-160, sep.-dez., 2019. DOI: 10.5935/PaeT.V12.N3.16

ORTEGA RODRIGUEZ, Daigard Ricardo; ANDRADE, Guilherme de Castro; BELLOTE, Antonio Francisco Jurado; TOMAZELLO- FILHO, Mario. Effect of pulp and paper mill sludge on the development of 17- year- old loblolly pine (*Pinus taeda* L.) trees in Southern Brazil. *Forest Ecology and Management*, v. 422, p.179- 189, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.04.016>

PIVA, Jonatas Thiago; BRENNER, Caroline Ferreira Ceia Ramos; SCHMITT, Djalma Eugênio. Uso de cinzas de madeira e cama de aviário no desenvolvimento inicial de

Eucalyptus benthamii. Revista de Ciências Agroveterinárias, UDESC, v. 23, n. 2, 2024.
DOI: 10.5965/223811712322024256

PUGA, Aline Peregrina; PIRES, Adriana Marlene Moreno; BETTIOL, Wagner;
ANDRADE, Cristiano Alberto de. Uso de biofertilizante na agricultura (Cap. 17). In:
BETTIOL, Wagner; SILVA, Carlos Alberto; CERRI, Carlos Eduardo Pellegrino; REIS,
Eduardo Righi dos; LÚCIO, Alessandro Dal Col; FORTES, Fabiano Oliveira; LOPES,
Sidinei José; SILVEIRA, Bruna Denardin da. Período de permanência de mudas de
Eucalyptus grandis em viveiro baseado em parâmetros morfológicos. **Revista Árvore**, v.
32, n. 5, Viçosa, MG, p. 809-814, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622008000500004>

RAIFUR, Márcio; STEFANO, Silvio Roberto; KOS, Sonia Raifur; RAIFUR, José;
RAIFUR, Natalia. Processo de tratamento de efluentes em uma indústria de papel. In:
Encontro dos Programas de Pós-graduação Profissionais em Administração (EMPRAD).
Anais [...], São Paulo, SP, 24-26 ago, 2016. Disponível em:
<https://sistema.emprad.org.br/arquivos/72.pdf>

RUDEK, Alynne; GARCIA, Flávio Augusto de Oliveira; PERES, Fabiana Schmidi
Bandeira. Avaliação da qualidade de mudas de eucalipto pela mensuração de área foliar
com o uso de imagens digitais. **Encyclopédia Biosfera**, v. 9, n. 17, Centro Científico
Conhecer, Goiânia, GO, 2013.

SACRAMENTO, Raquel Santos; SILVA, Joseane Oliveira da; FERRAZ, Lorena Lima;
PEREIRA, Samara Teixeira. Utilização de composto orgânico proveniente da indústria de
celulose na cultura do crambe (*Crambe abyssinica* Hochst). **Revista Brasileira de Meio
Ambiente**, v. 8, n.1, p. 43-52, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3612310>

SANTOS, Fernando E.; KUNZ, Sustanis H.; CALDEIRA, Marcos V. W.; AZEVEDO,
Carlos H. S.; RANGEL, Otacilio J. Características químicas de substratos formulados com
lodo de esgoto para produção de mudas florestais. **Revista Brasileira de Engenharia
Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 9, Campina Grande, PB, UAEA/UFCG, p. 971- 979, 2014.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/agriambi.v18n09p971-979>

SILVA, Michelangelo de Oliveira; VELOSO, Cássio Laurentino; NASCIMENTO, Denisson Lima do; OLIVEIRA, Jailson de; PEREIRA, Dalberto de Freitas; COSTA, Kleyton Danilo da Silva. Indicadores químicos e físicos de qualidade do solo. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 7, Curitiba, PR, p-47838-47855, jul, 2020. DOI: 10.34117/bjdv6n-431

SIQUEIRA, David Pessanha; BARROSO, Deborah Guerra; CARVALHO, Giovanna Campos Mamede Weiss de; ERTHAL, Rommel Monnerat; RODRIGUES, Maria Clara Coutinho; MARCIANO, Claudio Roberto. Lodo de esgoto tratado na composição de substrato para produção de mudas de *Plathymenia reticulata* Benth. **Ciência Florestal**, v. 29, n. 2, p. 728-739, abr./jun., 2019. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509827297>

SPEROTTO, Jessyca; DOLL, Maria Magdalena Ribas; HOMCZINSKI, Isabel. Uso de lodo de esgoto em plantios florestais de espécies de *Eucalyptus* spp. **Revista Liberato**, v. 24, n. 42, Novo Hamburgo, RS, p. 105-208, jul.-dez., 2023. DOI: 10.31514/RLIBERATO.2023V24N42.P147

TRIGUEIRO; R. de M.; GUERRINI, I. A. Uso de bioossólico como substrato para produção de mudas de eucalipto. **Scientia Forestalis**, n. 64, p. 150-162, dez, 2003.

VAZ; Luciano Mendes S.; GONÇALVES, José Leonardo de M. Uso de bioossólidos em povoamento de eucalipto: efeito em atributos químicos do solo, no crescimento e na absorção de nutrientes. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 26, n. 3, p. 747-758, 2002. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/hbLyPptdBRKHFqqz4JvjkQM/?format=pdf&lang=pt>

WENDLING, Ivar; GATTO, Alcides; PAIVA, Haroldo Nogueira de. **Substrato, adubação e irrigação na produção de mudas**. Ed. Aprenda fácil, Viçosa, MG., 166 p., 2002

WENDLING, Ivar. Produção de mudas de eucalipto (Capítulo 5). In: SANTAROSA, Emiliano; PENTEADO JÚNIOR, Joel Ferreira; GOULART, Ives Clayton Gomes dos Reis (editores técnicos). **Transferência da tecnologia florestal: cultivo do eucalipto em propriedades rurais: diversificação da produção e renda**. Embrapa, Brasília, DF, p. 41-42, 2014.

WREGE, Marcos Silveira; STEINMETZ, Silvio; REISSER JÚNIOR, Carlos; ALMEIDA, Ivan Reisser. **Atlas Climático da Região Sul do Brasil: Estados do Paraná, Santa**

Catarina e Rio Grande do Sul. Pelotas: Embrapa Clima Temperado; Colombo: Embrapa Florestas, 366 p., 2011.

ZORZETO, Thais Queiroz; DECHEN, Sonia Carmela Falci; ABREU, Mônica Ferreira de; FERNADES JÚNIOR, Flávio. Caracterização física de substratos para plantas. **Bragantia**, v. 73, n. 3, Campinas, SP, p. 300-311, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1678-4499.0086>

CAPÍTULO 3- AVALIAÇÃO ECOTOXICOLÓGICA DO USO DE BIOSSÓLIDO DA INDÚSTRIA DE PAPEL E CINZAS DE TERMOELÉTRICA NA COMPOSIÇÃO DE SUBSTRATOS

RESUMO

Este estudo teve como objetivo avaliar o potencial de uso do biossólido proveniente da indústria de papel e celulose como componente de substrato, em associação com cinzas de origem vegetal, para a produção de mudas de *Eucalyptus grandis*. O foco da pesquisa está na eficiência do desenvolvimento das mudas e na segurança ambiental, a partir de indicadores ecotoxicológicos e agronômicos. Com base nisso, buscou-se determinar a dose de biossólido ideal para utilização como substrato para produção de mudas florestais através da avaliação de seus efeitos ecotoxicológicos na reprodução de indivíduos da mesofauna do solo e no efeito sobre a germinação e desenvolvimento de espécies vegetais. O biossólido foi obtido pela estabilização do lodo gerado pela Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) da indústria de papel e celulose. As cinzas foram obtidas pela combustão de biomassa vegetal para geração de energia em termoelétrica. Os substratos foram compostos de casca de pinus compostada e casca de arroz carbonizada (1:1, v/v), enriquecidas com 15% de cinzas, em que foram adicionadas doses crescentes de biossólido. Os tratamentos foram estabelecidos segundo a proporção de biossólido utilizada em 0, 5, 10, 15 e 30%. O Solo Artificial Tropical (SAT) foi utilizado como tratamento controle e meio de validação dos ensaios ecotoxicológicos. Foram realizados testes de reprodução com as espécies *Folsomia candida* (colêmbolos) e *Enchytraeus albidus* (enquitreídeos) segundo as ISO 11267 e 16387, respectivamente. Para os testes com espécies vegetais foi utilizado *Avena sativa* (aveia) e *Lactuca sativa* (alface) segundo as diretrizes da ISO 11269-2. Os enquitreídeos e a aveia não demonstraram efeitos ecotoxicológicos em seu desenvolvimento. Os colêmbolos e a alface apresentaram efeitos tóxicos na dose de 30% de biossólido evidenciado pela redução da reprodução em *F. candida* e pela redução na germinação e desenvolvimento em *Lactuca sativa*. Os resultados obtidos evidenciam a necessidade de realizar uma avaliação cautelosa dos resíduos a serem utilizados na produção agrícola e florestal uma vez que estes podem causar impactos negativos no ambiente e em outros organismos.

Palavras-chave: Biossólido, cinzas de biomassa, ecotoxicologia, substrato.

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the potential use of biosolids from the pulp and paper industry as a substrate component, in association with plant-derived ash, for the production of *Eucalyptus grandis* seedlings. The focus of the research was on the efficiency of seedling development and environmental safety, based on ecotoxicological and agronomic indicators. Based on this, the objective was to determine the ideal biosolid dose for use as a substrate for forest seedling production by evaluating its ecotoxicological effects on the reproduction of soil mesofauna and its impact on the germination and development of plant species. The biosolids were obtained through the stabilization of sludge generated by the Effluent Treatment Plant (ETP) of the pulp and paper industry. The ash was derived from the combustion of plant biomass for energy generation in a thermoelectric plant. The substrates consisted of composted *Pinus* bark and carbonized rice husk (1:1, v/v), enriched with 15% ash, to which increasing doses of biosolid were added. The treatments were established according to the proportion of biosolids used with 0, 5, 10 15 e 30% biosolid content. Tropical Artificial Soil (TAS) was used as a control treatment and a validation medium for the ecotoxicological assays. Reproduction tests were conducted with the species *Folsomia candida* (springtails) and *Enchytraeus albidus* (enchytraeids) following ISO 11267 and 16387, respectively. For the plant species tests, *Avena sativa* (oat) and *Lactuca sativa* (lettuce) were used according to ISO 11269-2 guidelines. Enchytraeids and oat showed no ecotoxicological effects on their development. However, springtails and lettuce exhibited toxic effects at the 30% biosolid dose, as evidenced by reduced reproduction in *F. candida* and decreased germination and development in *Lactuca sativa*. The results highlight the need for careful evaluation of residues intended for agricultural and forestry production, as they may pose negative environmental impacts and affect other organisms.

Keywords: Biosolid, Biomass ash, ecotoxicology, substrate.

3.1. INTRODUÇÃO

O incentivo à utilização de resíduos como fonte de nutrientes e matéria orgânica para produção agrícola e florestal tem aumentado nas últimas décadas. A capacidade desses materiais fornecer nutrientes, especialmente nitrogênio e fósforo, aliado ao menor custo, torna-os atrativos em relação aos produtos minerais convencionais. No entanto, é necessário cautela para utilização de resíduos, pois eles podem conter contaminantes orgânicos e inorgânicos com destaque aos elementos traço (Pires; Matiazzo, 2008; Rocha *et al.*, 2013).

A aplicação de corretivos, fertilizantes e outros materiais como lodo de esgoto e resíduos industriais e da mineração, tem sido associada ao aumento dos teores de elementos traço no solo. A presença de cádmio (Cd), cobre (Cu), molibdênio (Mo), níquel (Ni) e zinco (Zn) é frequente nestes materiais, assim como a possibilidade de concentrações desbalanceadas de nutrientes e a presença de contaminantes biológicos e substâncias químicas (Souza *et al.*, 2018; Freddi, 2019). Apesar do elevado teor de nutrientes e da capacidade de melhorar as características físicas e químicas do solo e de substratos, a presença de elementos traço não inviabiliza o uso destes resíduos na produção agrícola e florestal (Rocha *et al.*, 2013). Contudo, torna-se essencial realizar uma caracterização física, química e biológica, bem como avaliar, seu potencial ecotoxicológico para garantir a segurança ambiental (Bandarra *et al.*, 2019).

A ecotoxicologia, nesse contexto, surge como uma ferramenta essencial para avaliar os riscos ambientais associados ao uso de materiais residuais. Ela permite identificar possíveis efeitos tóxicos dessas substâncias sobre organismos edáficos e vegetais, o que é fundamental para assegurar que a aplicação desses materiais seja segura e eficiente. Por meio de ensaios ecotoxicológicos, é possível determinar concentrações que não provoquem efeitos adversos relevantes, contribuindo para o manejo adequado dos resíduos e a proteção do ecossistema (Oliveira Filho *et al.*, 2018). Portanto, a ecotoxicologia terrestre apresenta grande potencial de aplicação na avaliação de substratos formulados a partir de resíduos industriais. Ao identificar possíveis riscos associados ao uso de biossólidos e cinzas de termoelétrica, torna-se possível definir doses seguras de aplicação, garantindo a segurança ambiental e contribuindo para o desenvolvimento sustentável.

O presente trabalho tem como objetivo realizar a avaliação ecotoxicológica com indicadores biológicos para avaliar o impacto de substratos formulados a partir de casca de

pinus compostada, casca de arroz carbonizada, cinzas de termoelétrica e biossólido da indústria de papel e celulose.

3.2. MATERIAIS E MÉTODOS

3.2.1. Localização

Os ensaios ecotoxicológicos foram conduzidos no Laboratório de Ecologia e Ecotoxicologia terrestre, localizado no Centro de Ciências Agroveterinárias- CAV/UDESC, em Lages, SC.

3.2.2. Formulação dos substratos

Os tratamentos foram constituídos de formulações de substrato obtidas a partir da mistura de casca de pinus compostada, casca de arroz carbonizada, cinzas de termoelétrica e biossólido da indústria de papel e celulose. As cascas de pinus e de arroz foram obtidas de fornecedores regulares. As cinzas cedidas por empresa de cogeração de energia localizada em Lages- SC, enquanto o biossólido foi obtido da estação de tratamento de efluentes (ETE) de empresa produtora de papel e celulose, com filial em Otacílio Costa- SC.

O biossólido é obtido através do sistema de lodo ativado. Este sistema utiliza a adição de microrganismos para oxidação e decomposição da matéria orgânica resultando em um material orgânico enriquecido a partir da ação de microrganismos (Foelkel, 2014). Antes da formulação, as cinzas foram secas em estufa 60° C por três dias e peneiradas em peneira de 2 mm. O biossólido foi igualmente seco em estufa a 60° C por aproximadamente quinze dias, moído em moinho martelo e peneirado em peneira de 2 mm para padronizar sua granulometria.

A formulação básica foi preparada utilizando casca de pinus e casca de arroz carbonizada em proporção 1:1 (v/v), peneirada em peneira de 8 mm. A esta mistura foram adicionadas cinzas de termoelétrica na proporção de 15% em relação volume total, resultando em substrato de base homogênea. A dose de cinzas de biomassa a ser utilizada foi determinada com base nos resultados preliminares do uso de cinzas na produção de mudas

de espécies vegetais obtidos por Cavalcante Lopes (2024). Estes dados demonstraram efeitos positivos no crescimento de mudas de alface (*Lactuca sativa*) e bracatinga (*Mimosa scrabella* Benth) em doses de até 15% de cinzas adicionadas a substrato comercial.

Os tratamentos foram identificados conforme a dose de bioassolo aplicado em relação ao volume total: 0% (T1), 5% (T2), 10% (T3), 15% (T4) e 30% (T5). Um tratamento controle foi incluído, utilizando solo artificial tropical (SAT), conforme recomendado pela ABNT para ensaios ecotoxicológicos. O SAT é um substrato artificial padronizado composto por 10% de fibra de coco, 20% de argila caulinita e 70% de areia de quartzo. Para realização dos testes o pH é corrido para uma faixa entre 5,5 e 6,5 e a umidade mantida entre 40 e 50%. A utilização do SAT como controle visa minimizar as influências externas sobre o teste e serve como meio de validação (Oliveira Filho *et al.*, 2018). A composição detalhada dos tratamentos está apresentada na tabela 14.

Tabela 14- Composição dos substratos com doses crescentes de bioassolo para ensaio ecotoxicológico

| Tratamentos | Composição |
|--------------------|---|
| SAT | 70% areia + 20% caulinita + 10% Fibra de coco; |
| 0% | Casca de pinus e casca de arroz (1/1) + 15% cinzas (Mistura base) |
| 5% | Mistura base + 5% de bioassolo |
| 10% | Mistura base + 10% de bioassolo |
| 15% | Mistura base + 15% de bioassolo |
| 30% | Mistura base + 30% de bioassolo |

Fonte: elaborado pelo autor, 2024.

A tabela 15 exibe as propriedades físicas e químicas dos substratos. A concentração de elementos traço presentes nos substratos é apresentada na tabela 16.

Tabela 15- Propriedades físicas e químicas dos substratos com doses crescentes de bioassólido utilizados para avaliação ecotoxicológica

| Propriedades | Doses de bioassólido no substrato | | | | |
|-------------------------|--|-----------|------------|------------|------------|
| | 0% | 5% | 10% | 15% | 30% |
| PT (%) | 78,0 | 75,8 | 76,9 | 75,0 | 77,8 |
| EA (%) | 44,7 | 40,2 | 36,9 | 38,6 | 32,8 |
| AFD (%) | 9,3 | 8,2 | 11,5 | 10,0 | 12,4 |
| AR (%) | 20,9 | 22,4 | 24,5 | 23,3 | 28,7 |
| DS (g/cm ³) | 0,20 | 0,23 | 0,26 | 0,30 | 0,41 |
| CE (mS/cm) | 0,14 | 0,23 | 0,36 | 0,39 | 0,55 |
| pH (H ₂ O) | 7,03 | 7,37 | 7,33 | 7,30 | 7,53 |

*PT- porosidade total, EA- espaço de aeração, AFD- água facilmente disponível, AR- água remanescente, DS- densidade seca, CE- condutividade elétrica, pH- potencial hidrogeniônico.

Fonte: elaborado pelo autor, 2024

Tabela 16– Concentração de elementos traço nos substratos com doses crescentes de bioassólido

| Elementos (mg kg⁻¹) | Doses de bioassólido no substrato | | | | |
|---|--|-----------|------------|------------|------------|
| | 0% | 5% | 10% | 15% | 30% |
| As | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 7,6 | 15,1 |
| Ba | 80,0 | 80,0 | 80,0 | 90,0 | 90,0 |
| Cd | 2,80 | 3,50 | 2,10 | 1,80 | 1,80 |
| Cr | 143,7 | 136,8 | 109,5 | 116,3 | 150,5 |
| Ni | 10,7 | 62,9 | 62,9 | 68,2 | 59,7 |
| Pb | 55,7 | 65,0 | 55,7 | 64,9 | 55,7 |
| Zn | 81,0 | 84,0 | 86,0 | 87,0 | 91,0 |

*Dados obtidos por fluorescência de raio-x (FRX) com exceção do Cd; ** %Recuperação obtida com base no teor de elementos presentes na amostra NIST 2709 A recuperados pelo equipamento.

***Os elementos apresentaram as seguintes % de recuperação: Arsênio (As) 85,6%; bário (Ba) 91,0%; crômio (Cr) 68,4%; níquel (Ni) 116,0%, chumbo (Pb) 98,2% e zinco (Zn) 121,2%.

Fonte: elaborado pelo autor, 2024

3.2.3. Ensaios ecotoxicológicos com organismos edáficos

As avaliações ecotoxicológicas foram realizadas a partir de ensaios de reprodução realizados com os colêmbolos *Folsomia candida* e os enquitreídeos *Enchytraeus albidus*. Ambas as espécies obtidas das populações permanentes mantidas no Laboratório de Ecologia e Ecotoxicologia do CAV/UDESC. As populações são mantidas em ambiente controlado $20 \pm 2^\circ\text{C}$, 18:8 h luz: escuro de fotoperíodo, alimentados semanalmente com levedura *Saccharomyces cerevisiae* (para colêmbolos) e aveia fina moída, (para enquitreídeos). Os colêmbolos são mantidos em meio composto por gesso, carvão ativado (10:1 m/m) enquanto os enquitreídeos são cultivados em recipientes contendo solo artificial tropical (SAT) a umidade do meio é ajustada semanalmente com água destilada.

Os ensaios de reprodução seguiram as metodologias previstas nas normativas ISO 11267 (1999) para colêmbolos e ISO 16387 (2014) para enquitreídeos. De forma geral, os ensaios foram conduzidos com quatro repetições por tratamento sendo utilizadas 30 g de material para cada repetição, com umidade corrigida para 50% da capacidade de retenção de água (CRA) de cada mistura. As condições experimentais foram mantidas em ambiente controlado com temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$, durante 28 dias. A alimentação dos organismos, assim como o controle da umidade e aeração das unidades experimentais, foi realizada semanalmente.

Para o ensaio com *Folsomia candida* foram utilizados dez indivíduos sincronizados, com idade entre dez e doze dias de vida, por repetição. A sincronização dos colêmbolos é um procedimento essencial para garantir que todos os organismos utilizados tenham a mesma idade. Esse processo é realizado pela remoção de ovos da população permanente e alocação em um novo recipiente. Dois dias após o início da eclosão, os demais ovos são retirados, assegurando a homogeneidade etária dos indivíduos a serem utilizados no ensaio. Para o ensaio com a espécie *Enchytraeus albidus* foram utilizados dez indivíduos clitelados. A presença do clitelo em indivíduos do gênero *Enchytraeus* spp. significa que estes organismos se encontram em idade reprodutiva.

Após o período de 28 dias, os ensaios foram desmontados e foi realizada a contagem dos indivíduos adultos e juvenis. Para os enquitreídeos, foi aplicado o processo de fixação e coloração com a utilização do corante rosa bengala (1% m/v em etanol) para facilitar a visualização dos organismos, que foram contados manualmente sob estereomicroscópio com

aumento de 60×. Os colêmbolos foram avaliados pelo método de flotação, que consiste na adição de água e gotas de tinta para carimbo à unidade experimental. Em seguida, foi registrado fotografia dos indivíduos flutuando na superfície, e a contagem manualmente com o auxílio software ImageJ

3.2.4. Ensaios ecotoxicológicos com espécies vegetais

As avaliações ecotoxicológicas com espécies vegetais foram realizadas por meio de ensaios de germinação e o desenvolvimento aveia (*Avena sativa*) como planta monocotiledônea teste e alface (*Lactuca sativa*) como planta dicotiledônea-teste. Os ensaios foram conduzidos em ambiente controlado com temperatura de aproximadamente $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$. Foram utilizadas seis repetições por tratamento e os tratamentos compostos pelos substratos formulados com teores crescentes de biossólido, com a umidade corrigida para 50% da CRA de cada substrato.

Em cada repetição foram semeadas dez sementes de aveia e alface, individualmente. A irrigação foi realizada manualmente com água destilada a cada dois dias. A germinação foi avaliada no momento em que as unidades do controle (SAT) apresentaram em média cinco sementes germinadas. Quando as unidades do controle apresentavam em média sete indivíduos germinados, realizou-se a retirada das plantas excedentes de todos os tratamentos, mantendo-se cinco plantas por repetição para posterior avaliação do desenvolvimento. Este procedimento foi aplicado tanto para os ensaios com aveia quanto para alface.

No ensaio com aveia, as avaliações foram realizadas aproximadamente 28 dias após a semeadura, analisando-se o número de folhas, altura de plantas, massa fresca e massa seca da parte aérea bem como massa fresca e seca das raízes. No ensaio com alface, as avaliações ocorreram 35 dias após a semeadura, contemplando o número de folhas, massa fresca e seca da parte aérea e das raízes.

3.2.5. Análise estatística

Os dados obtidos pelos ensaios ecotoxicológicos com as espécies *Folsomia candida* (colêmbolos), *Enchytraeus albidus* (enquitreideos), *Avena sativa* (Aveia) e *Lactuca sativa*

(alface) foram comprados com os valores obtidos no controle utilizando o teste *post-hoc* de Dunnnet ($p > 0,05$).

As diferenças estatísticas encontradas nesta análise permitiram estabelecer a CENO (Concentração de efeito Não Observado) e a CEO (Concentração de Efeito Observado). A normalidade dos dados e a homogeneidade das variâncias foram verificadas pelo teste de Shapiro-Wilk ($p > 0,05$) e Levene ($p > 0,05$), respectivamente. As concentrações efetivas para 50% de efeito (CE₅₀) foram estimadas com base nas concentrações medidas, utilizando modelos não lineares no software Statistica 7.0 (STATSOFT, Inc., 2004).

3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1. Validação dos testes

O ensaio com *Enchytraeus albidus*, atendeu aos critérios estabelecidos pela ISO 16387 (2014). No grupo controle (SAT), foram observados os seguintes resultados: média 8 adultos por unidade indicando mortalidade média inferior a 20%. O número de juvenis foi superior a 25 (média de 435 por unidade) com coeficiente de variação (CV) de 32,7% (inferior ao limite de 50%). O ensaio com *Folsomia candida* também atendeu aos critérios estabelecidos pela ISO 11267 (1999). As réplicas do controle apresentaram mortalidade inferior a 20%, a média de indivíduos adultos foi 8 e de juvenis 78 indivíduos, com CV de 20,6% (inferior ao limite de 30%).

Os ensaios com espécies vegetais atenderam aos critérios de validação da ISO 11269-2 (2012) que exigem a emergência de, no mínimo 7 plantas saudáveis a partir das 10 sementes semeadas, além de ausência de sinais visíveis de fitotoxicidade e uma taxa de sobrevivência de pelo menos 90% das plântulas.

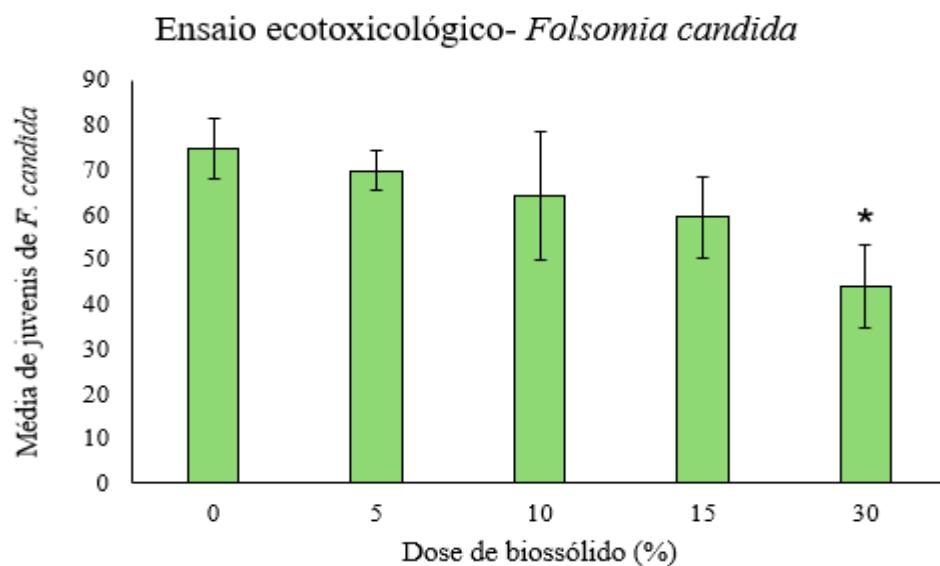
3.3.2. Ensaios ecotoxicológicos com invertebrados edáficos

Os ensaios de reprodução com *Folsomia candida* e *Enchytraeus albidus* apresentaram respostas distintas às diferentes doses de biossólido aplicadas. Para *Folsomia*

candida, foi observada uma redução significativa no número de indivíduos a partir da dose de 30% de bioassólido.

A concentração mais alta sem efeito negativo observado (CENO) foi determinada na dose de 15% de bioassólido, enquanto a concentração com efeito observado (CEO) foi verificada na dose de 30%. A partir desses dados, foi possível estimar a CE₅₀ (Concentração Efetiva que reduz a população em 50%), que resultou em 37,85% de bioassólido. Em contrapartida, para *Enchytraeus albidus* não foram observados efeitos significativos em nenhuma das doses testadas, impossibilitando a determinação de um valor de CE₅₀ para essa espécie. As figuras 5 e 6 exibem esses resultados.

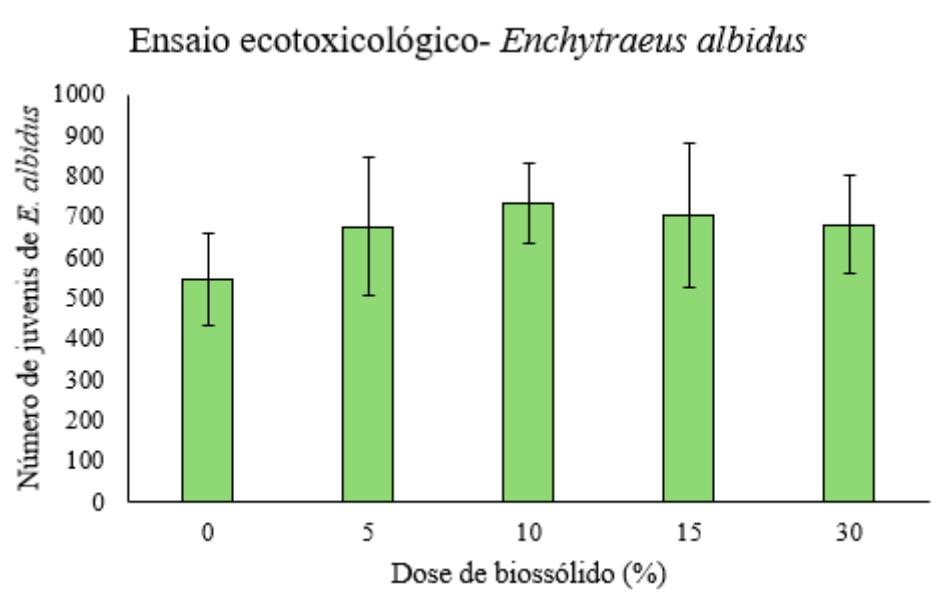
Figura 5- Avaliação dos ensaios de reprodução com *F. candida* em substratos com doses crescentes de bioassólido



O () indica diferença significativa entre o tratamento e o controle (SAT) pelo teste de Dunnet a 5% de significância.

Fonte: elaborado pelo autor, 2024.

Figura 6- Avaliação dos ensaios de reprodução com *E. albidus* em substratos com doses crescentes de biossólido



O () indica diferença significativa entre o tratamento e o controle (SAT) pelo teste de Dunnet a 5% de significância

Fonte: elaborado pelo autor, 2024.

Os resultados obtidos indicam uma maior sensibilidade de *Folsomia candida* ao biossólido em comparação com *Enchytraeus albidus*. Esse efeito pode estar relacionado a fatores químicos e físicos do substrato. Um dos fatores mais relevantes é a concentração de elementos traço nos tratamentos com maior dose de biossólido. No tratamento com 30% de biossólido, que apresentou maior efeito negativo sobre os colêmbolos, foram detectadas as seguintes concentrações de elementos traço: As – 15 mg/kg, Ba – 90 mg/kg, 150 mg/kg, Pb – 55,7 mg/kg e Zn – 91 mg/kg. Embora esses valores estejam dentro dos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 498/2020, permitindo a aplicação do biossólido, ainda assim essas concentrações podem exercer efeitos tóxicos sobre os organismos edáficos, especialmente em doses mais elevadas.

Em relação a presença de elementos traço nos substratos, destaca-se o arsênio (As) uma vez que este foi observado apenas nas doses mais altas (15 e 30%) e, principalmente, na dose que apresentou maior efeito negativo sobre os colêmbolos. Segundo Alves *et al.* (2018) a presença de As pode afetar negativamente o crescimento e a reprodução de *Folsomia candida* inclusive em doses baixas (inferiores a 1 mg/kg). Contudo, destacam que a toxicidade deste elemento pode variar de acordo com as características do substrato. Neste

estudo os autores determinaram, para esta espécie, uma EC₅₀ de 26, 1 mg/kg com a utilização de solo artificial e acima de 135 mg/kg para o solo testado.

A influência das condições ambientais sobre a capacidade de resistência dos organismos edáficos e a toxicidade de elementos traço também é abordada por Lin *et al.* (2019). A variação do pH, por exemplo, pode aumentar ou reduzir a biodisponibilidade destes elementos e potencializar a resposta desses organismos. Outros estudos corroboram esses achados. Alves *et al.* (2023) observaram que, apesar de não haver impacto significativo na sobrevivência de *Folsomia candida* e *Enchytraeus crypticus* expostos a rejeitos de mineração, houve uma redução expressiva na reprodução, destacando a sensibilidade reprodutiva dos colêmbolos.

Em contraste, Almeida et al., (2019) não identificaram efeitos significativos na reprodução de *Folsomia candida* exposta a diferentes doses de arsênio, sugerindo que a toxicidade depende não apenas da presença de elementos traço, mas também de outros fatores ambientais, como pH e aeração. Além da presença de elementos traço, outros fatores físicos e químicos do substrato podem ter contribuído para os resultados observados. O pH do substrato variou de 7,0 na dose de 0% de biossólido a 7,5 na dose de 30%, enquanto o intervalo recomendado para esses ensaios é de 5,5 a 6,5. O aumento do pH pode reduzir a disponibilidade de alguns nutrientes e interferir na sobrevivência e reprodução de organismos sensíveis, como os colêmbolos.

Outro aspecto importante é a relação entre macroporos e microporos no substrato. O substrato com 30% de biossólido apresentou o menor índice de aeração (32,8%) e a maior retenção de água (28,7%) entre os tratamentos, o que pode ter diminuído a disponibilidade de oxigênio no solo, afetando negativamente os organismos que dependem de ambientes bem aerados, como *Folsomia candida*. Fountain & Hopkin (2005) ressaltam a importância de ambiente úmidos, mas bem drenados e da necessidade de farta oferta de oxigênio para o melhor desenvolvimento dessa espécie. Destacam também a influência do pH na capacidade reprodutiva de *F. candida* uma vez que os melhores desempenhos são observados em pH próximo a neutralidade enquanto ambientes mais ácidos e alcalinos tendem a impactar negativamente sua reprodução.

Além dos efeitos do biossólido presente nos tratamentos, o comportamento apresentado pelos colêmbolos é corroborado pelos resultados obtidos por Cavalcante Lopes

(2024) que apontam efeitos negativos das cinzas sobre esta espécie a partir da dose de 5% de cinzas, dose esta consideravelmente inferior aos 15% estipulados para o presente trabalho. Por outro lado, a ausência de efeitos significativos em *Enchytraeus albidus* sugere que essa espécie pode ser mais tolerante às variações físicas e químicas do substrato. Em seu trabalho, Amorim *et al.* (2008) aponta que *Enchytraeus albidus* apresentou menor sensibilidade mediante testes com metais e alguns pesticidas. Este comportamento pode estar relacionado à ecologia da espécie *Enchytraeus albidus*. Estes organismos habitam camadas mais profundas do solo e por possuírem uma fisiologia diferente, podem estar menos expostos a contaminantes presentes na superfície do substrato, como elementos traço. Esse resultado é relevante, pois indica que, em ecossistemas onde enquitreídeos predominam, doses de até 30% de bioassólido podem ser consideradas seguras.

Portanto, mesmo que *Enchytraeus albidus* não tenha apresentado efeitos negativos, a resposta de *Folsomia candida* sugere a necessidade de cautela na aplicação de doses elevadas de bioassólido, especialmente em ambientes onde os colêmbolos desempenham um papel ecológico importante. Além disso, é importante ressaltar que o ambiente pode interferir significativamente na toxicidade dos compostos e elementos presentes nos materiais utilizados na formulação dos substratos. Dessa forma a utilização de doses mais baixas pode ser o diferencial para garantir a segurança ambiental do local em que serão alocados.

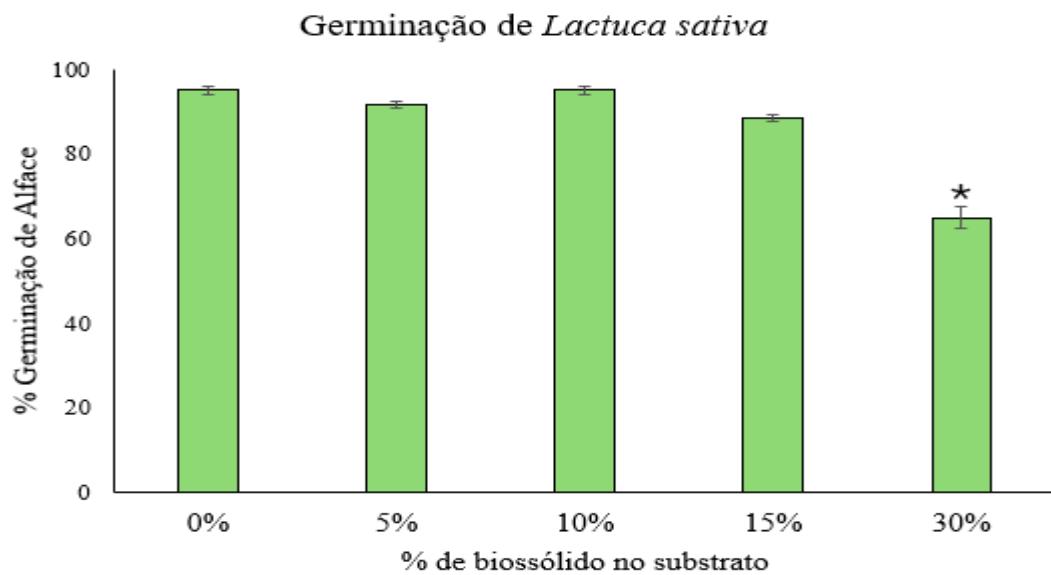
A combinação de resultados obtidos para ambas as espécies permite não apenas identificar uma dose segura para enquitreídeos, mas também definir doses críticas a partir das quais colêmbolos começam a sofrer impactos. Essa abordagem integrada é essencial para a avaliação de riscos e para garantir a segurança ambiental em diferentes ecossistemas.

3.3.3. Ensaios ecotoxicológicos com espécies vegetais

Os ensaios de germinação realizados com *Avena sativa* (aveia) e *Lactuca sativa* (alface) demonstraram resultados distintos. Não houve variação significativa na germinação das sementes de aveia, enquanto, para as sementes de alface, foi observada uma redução significativa na porcentagem de germinação na dose de 30% de bioassólido (Figuras 7 e 8).

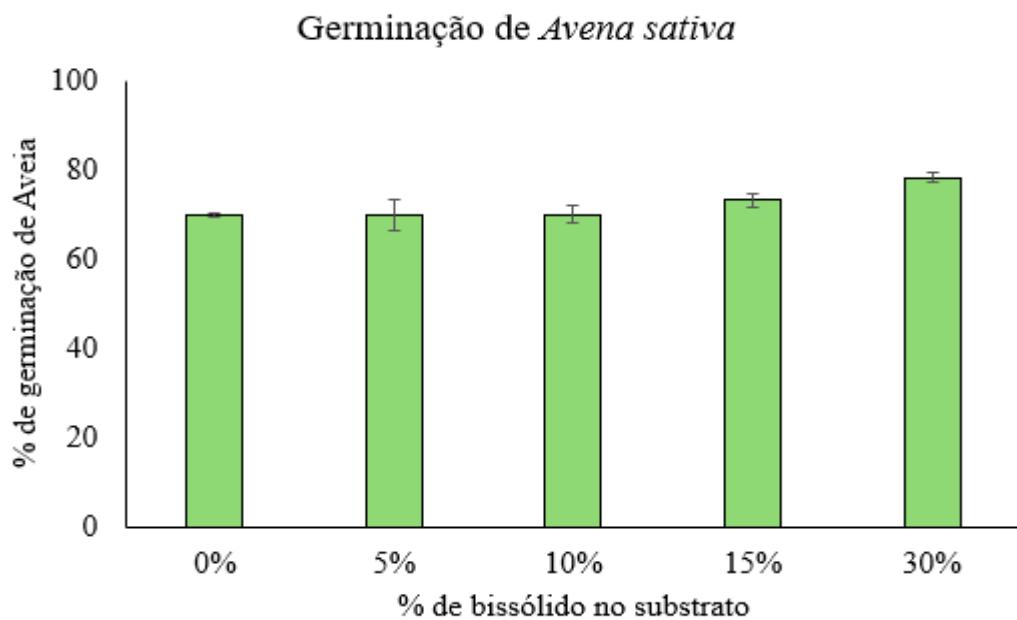
Com base nesses dados, foi determinada a EC₅₀ para a alface, que resultou em 37,41% de bioassólido, enquanto, para aveia, não foi possível determinar a EC₅₀, já que não houve efeitos significativos.

Figura 7 – Avaliação da germinação de *L. sativa* em substratos com doses crescentes de bioassólido



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 8 – Avaliação da germinação de *A. sativa* em substratos com doses crescentes de bioassólido

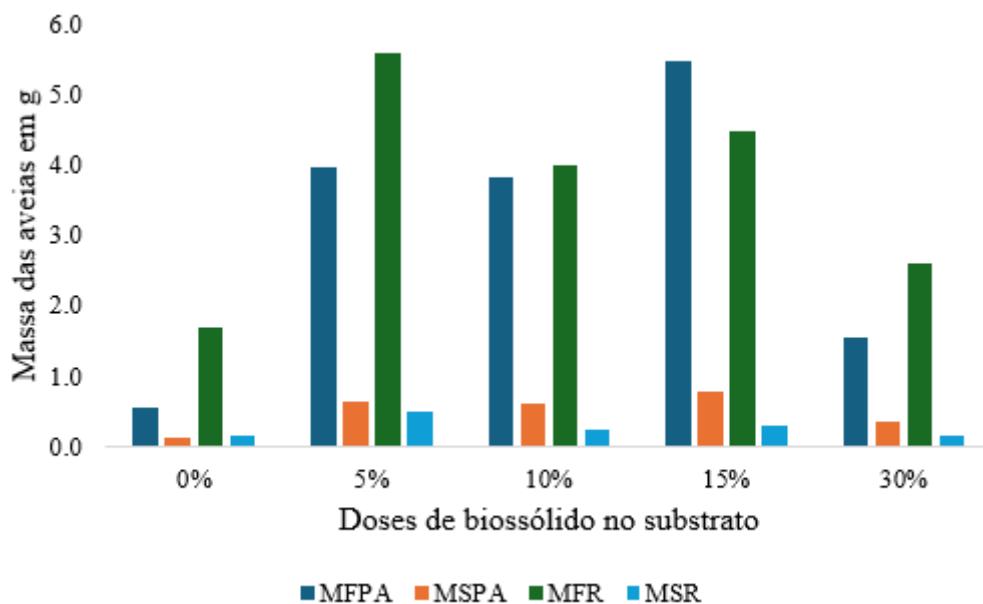


O () indica diferença significativa entre o tratamento e o controle (SAT) pelo teste de Dunnet a 5% de significância

Fonte: elaborado pelo autor, 2024.

A figura 9 exibe a biomassa acumulada pelas plantas de aveia, enquanto a Figura 10 mostra a biomassa acumulada pelas plantas de alface. Para aveia massa fresca da parte aérea (MFPA) foi maior no substrato com 15% de biossólido enquanto a maior massa fresca de raiz (MFR) foi obtida na dose de 5%. Já a massa seca da parte aérea (MSPA) e a massa seca de raiz (MSR) apresentaram pouca variação entre os tratamentos.

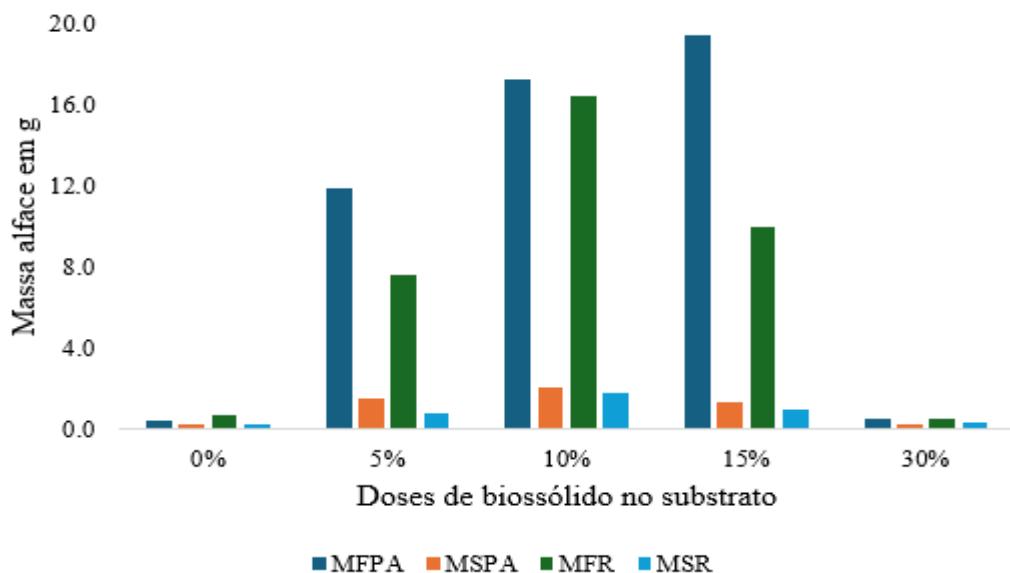
Figura 9– Avaliação da biomassa (g) de *Avena sativa* desenvolvida em substratos com doses crescentes de biossólido



Fonte: elaborado pelo autor, 2024

A alface, por outro lado, apresentou comportamento interessante, pois houve desenvolvimento similar das plantas nas doses de 5, 10 e 15% de biossólido, enquanto a dose de 30% e o controle (SAT) exibiram respostas significativamente inferiores. A massa fresca da parte aérea (MFPA) foi maior no substrato com 15% de biossólido enquanto a maior massa fresca de raiz (MFR) na dose de 10%. Já a massa seca da parte aérea (MSPA) e a massa seca de raiz (MSR) apresentaram pouca variação entre os substratos com 5, 10 e 15% de biossólido.

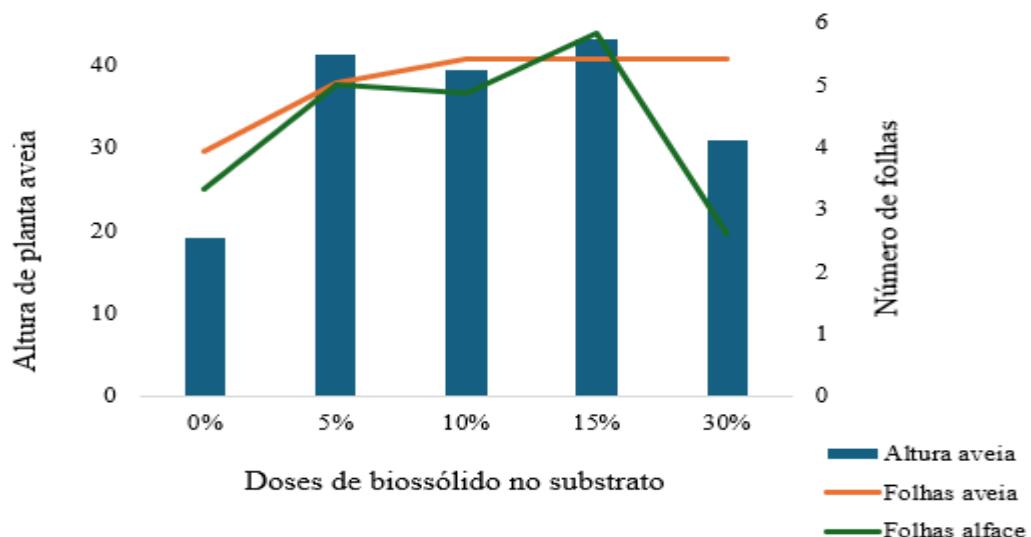
Figura 10– Avaliação da biomassa (g) de *Lactuca sativa* desenvolvidas em substratos com doses crescentes de bioassólido



Fonte elaborado pelo autor, 2024.

As alturas das plantas e o número de folhas obtidos nos ensaios de *Avena sativa* e *Lactuca sativa* estão apresentados na Figura 11 . A aveia obteve número de folhas semelhantes entre as doses de bioassólido, no entanto as maiores alturas de planta foram obtidas nos tratamentos com 5 e 15%. Já a alface apresentou maior número de folhas na dose de 15% de bioassólido.

Figura 11- Avaliações de altura e número de folhas de *A. sativa* e número de folhas de *L. sativa* desenvolvidas em substratos com doses crescentes de bioassólido



Fonte: elaborado pelo autor, 2024.

Contrastando com os resultados de germinação, as avaliações de massa fresca e seca de parte aérea (MFPA e MSPA) e massa fresca e seca de raiz evidenciam redução significativa na produção de biomassa das plantas de aveia na dose de 30% de bioassólido. A altura de plantas de aveia também apresentou redução no mesmo tratamento. No caso da alface, as variáveis de desenvolvimento seguiram o mesmo comportamento observado na germinação, com redução significativa na dose de 30%. Apesar dessa redução em ambos os casos, a comparação das médias pelo teste de Dunnet ($p > 0.05$) indicou que todos os tratamentos apresentaram médias superiores ao controle nos ensaios de desenvolvimento.

Segundo dados obtidos por Cavalcante Lopes (2024), a germinação e emergência de sementes de alface não foram afetados com as doses de cinzas (0, 7,5, 10, 15, 20 e 100%) utilizadas em mistura com substrato comercial. Além disso, doses até 15% de cinzas, como a utilizada neste trabalho, propiciaram melhor desenvolvimento das mudas de alface resultando em maior acúmulo de biomassa. Esses resultados sugerem que o substrato com 30% de bioassólido apresentou características físicas e químicas que podem ter influenciado negativamente o crescimento das plantas. Entre os fatores que podem ter contribuído para esse efeito, destacam-se a capacidade de aeração (EA) e de retenção de água (AR) do substrato.

O tratamento com 30% de bioassólido apresentou os menores índices de aeração e os maiores índices de retenção de água, o que pode ter levado a uma menor oxigenação das raízes e ao encharcamento do solo. Esse tipo de condição pode prejudicar a absorção de nutrientes pelas plantas e limitar o crescimento radicular. De acordo com Kratz et al. (2013), a capacidade de aeração e a retenção de água são fatores determinantes na qualidade do substrato e no desenvolvimento das plantas, sendo que baixos índices de aeração e altos índices de retenção podem comprometer o desenvolvimento radicular e, consequentemente, a parte aérea.

As propriedades físicas do substrato, como densidade e porosidade, são inerentes aos materiais utilizados e de difícil modificação. De acordo com Fermino e Mieth (2018), os valores médios considerados ideais para substratos são: densidade entre 0,25 e 0,5 g/cm³, porosidade total (PT) entre 75 e 85% e água facilmente disponível (AFD) entre 20 e 30%. A água remanescente, que corresponde à água retida em microporos de difícil acesso às plantas, deve apresentar valores entre 5 e 15%.

Embora os tratamentos utilizados no presente estudo tenham apresentado densidade e porosidade adequadas, o teor de água remanescente foi elevado, o que pode ter contribuído para o comprometimento do desenvolvimento das plantas, especialmente na dose de 30% de biossólido, onde o substrato apresentou menor capacidade de aeração e maior retenção de água. Outro fator importante a ser considerado é o pH do substrato, que influencia diretamente a disponibilidade de nutrientes e toxicidade de elementos no solo. A faixa de pH ideal para a maioria das espécies vegetais está entre 5,0 e 6,5. Valores abaixo de 5,0 podem aumentar a disponibilidade de elementos potencialmente tóxicos, como alumínio (Al), e causar a deficiência de nutrientes essenciais, como nitrogênio (N), potássio (K) e magnésio (Mg). Já valores de pH superiores a 6,5 podem reduzir a disponibilidade de micronutrientes, além de inferir na absorção de fósforo (P) (Kratz et al., 2013).

Nos tratamentos avaliados, foram observados valores de pH elevados, com média de 7,0, sendo que o tratamento com 30% de biossólido apresentou o maior pH (7,5). Esse pH mais elevado pode ter reduzido a disponibilidade de micronutrientes essenciais ao desenvolvimento das plantas, contribuindo para a redução na biomassa observada. Essa alteração pode ter sido suficiente para afetar a absorção de nutrientes em plantas mais sensíveis, como a alface, o que explicaria a maior redução de biomassa nesse caso.

Por fim, cabe ressaltar que a combinação de fatores físicos e químicos do substrato (retenção de água, aeração e pH) pode ter exercido um efeito sinérgico, influenciando de maneira mais intensa o desenvolvimento das plantas na dose de 30% de biossólido. Esses resultados reforçam a necessidade de monitoramento cuidadoso das condições físicas e químicas do substrato quando biossólidos são utilizados como componente de solo, especialmente em doses superiores a 15%, para evitar impactos negativos no desenvolvimento vegetal.

3.4. CONCLUSÃO

O presente trabalho tem como objetivo realizar a avaliação ecotoxicológica com organismo edáficos e vegetais para avaliar o impacto de substratos formulados a partir de casca de pinus compostada, casca de arroz carbonizada, cinzas de termoelétrica e biossólido da indústria de papel e celulose.

O tratamento contendo 30% de biossólido apresentou maior impacto negativo evidenciado pela redução da reprodução de *Folsomia candida* e redução da germinação e desenvolvimento de plantas de *Lactuca sativa*. Em contrapartida, *Enchytraeus albidus* e *Avena sativa* não apresentaram efeitos significativos, destacando a variabilidade na sensibilidade dos organismos avaliados.

A EC₅₀ estimada foi de 37, 85% para colêmbolos e 37, 41% para a alface, com efeitos significativos observados a partir da dose de 30% de biossólido. Esses resultados reforçam a necessidade de avaliar compostos como biossólidos, por meio de ensaios ecotoxicológicos que incluem organismos de diferentes nichos, como artrópodes, oligoquetas e plantas, uma vez que suas respostas podem variar. Adotar essa abordagem integrada permite identificar concentrações seguras e minimizar riscos ao ambiente.

Com base nos resultados, recomenda-se a utilização de até 15% de biossólido, concentração que não comprometeu significativamente a reprodução de organismos edáficos nem o desenvolvimento vegetal, garantindo maior segurança ambiental.

3.5. REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Luana Esteter de; ZANATTA, Maraline C. K.; MARTINS, Marcela R.; PIRES, Marta Siviero Guilherme. Bioensaios toxicológicos com sementes e organismos do solo para avaliação do efeito do arsênio (As). **Revista dos Trabalhos de Iniciação Científica da UNICAMP**, Campinas, SP, n. 27, out, 2019

ALVES, Obede Rodrigues; OGURA, Allan Pretti; PINTO, Thandy Junio da Silva; ESPÍNDOLA, Evaldo Luiz Gaeta. Terrestrial species exposed to mining tailings: Assessing the potential ecotoxicological impacts of the Fundão Dam collapse in Brazil. **Journal of Trace Elements and Minerals**, v. 6, 2023. DOI:
<https://doi.org/10.1016/j.jtemin.2023.100102>

ALVES, Paulo Roger Lopes; SILVA, Evandro Barbosa da; CARDOSO, Elke Jurandy Bran Nogueira; ALLEONI, Luís Reynaldo Ferracciú. Ecotoxicological impact of arsenic on earthworms and collembolans as affected by attributes of a highly weathered tropical soil. **Environ. Sci. Pollut. Res.**, n. 25, p. 13217- 13225, 2018. DOI: 10.1007/s11356-016-6839-2

AMORIM, Mónica J. B.; NOVAIS, Sara; RÖMBKE, Jörg; SOARES, Amadeu M. V. M. *Enchytraeus albidus* (Enchytraeidae): A test organism in a standardised avoidance test? Effects of different Chemical substances. **Environment International**, v. 34, p. 363-371, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2007.08.010>

BANDARRA, Beatriz Sales; PEREIRA. Joana Luísa; MARTINS, Rui C.; QUINA, Margarida J. Avaliação ecotoxicológica para classificação de resíduos. **Revista Captar**, v.8, n. 2, p.51-66, 2019. DOI: <https://doi.org/10.34624/captar.v8i2.3540>

BIANCHI, Miriam de Oliveira; CORREIA, Maria Elizabeth Fernandes; RESENDE, Alexander Silva de; CAMPELLO, Eduardo Francia Carneiro. **Importância de estudos ecotoxicológicos com invertebrados do solo**. Embrapa Agrobiologia (Documentos 266), Seropédica, RJ, 32 p., 2010.

CAVALCANTE LOPES, Betel. **Uso de biocarvão em sistema de produção de mudas**. 2024. Tese (Doutorado em Ciência do Solo)- Centro de Ciências Agroveterinárias, Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2024.

FIRMINO, Maria Helena; MIETH, Patrícia. Análise de substratos para produção de mudas de espécies florestais (capítulo 8). In: ARAUJO, Maristela Machado; NAVROSKI, Marcio Carlos; SCHORN, Lauri Amândio. **Produção de sementes e mudas: um enfoque à silvicultura**, ed. UFSM, Santa Maria, RS, P. 167-186, 2018.

FOUNTAIN, Michelle T.; HOPKIN, Steve P. *Folsomia candida* (Collembola): a “standard” Soil Arthropod. **Annu. Rev. Entomol.**, n. 50, p. 501-522, 2005. DOI: [10.1146/annurev.ento.50.071803.130331](https://doi.org/10.1146/annurev.ento.50.071803.130331)

FREDDI, Letícia Amadeu. Riscos associados à aplicação de lodo de esgoto na agricultura. **Revista Científica ANAP Brasil**, v.12, n. 24, 2019.
DOI: <https://doi.org/10.17271/19843240122420191982>

ISO 11267. Soil quality- **Inhibition of reproduction of Collembola (*Folsomia candida*) by soil polluants**. 1 ed., 1999.

ISO 16387. Soil quality- **Effects of contaminants on Enchytraeidae (*Enchytraeuss* sp.)-** Determination of effects on reproduction. 2 ed., 2014.

ISO 11269-2. Soil quality- Determination of the effects of pollutants on soil flora- Part 2: Effectos of contaminated soil on the emergence and early growth of higher plants. 3 ed., 2012.

KRATZ, Dagma; WENDLING, Ivar; NOGUEIRA, Antonio Carlos; SOUZA, Paulo Vitor de. Propriedades físicas e químicas de substratos renováveis. **Revista Árvore**, v. 37, n. 6, Viçosa, MG, p. 1103-1113, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622013000600012>

LIN, Xianglong; SUN, Zaijin; ZHAO, Long; MA, Jin; Li, Xing; HE, Fei; HOU, Hong. The toxicity of exogenous arsenic to soil-dwelling springtail *Folsomia candida* in relation to soil properties and aging time. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, n. 171, 530-538, 2019. DOI: 101016/j.ecoenv.2018.12.059.

OLIVEIRA FILHO, Luís Carlos Iuñes de; SEGAT, Julia Corá; BARETTA, Dilmar; KLAUBERG FILHO, Osmar (Org.). **Ecotoxicologia terrestre: métodos e aplicações de ensaios com collembola e isopoda**, UDESC, Florianópolis, SC, 2018.

PIRES, Adriana M Moreno. MATIAZZO, Maria Emilia. **Avaliação da viabilidade do uso de resíduos na agricultura**. Circular técnica 19, Embrapa, Jaguariúna, SP, nov., 2008.

ROCHA, Igor Tenório Marinho da; SILVA, Anibia Vincente da; SOUZA, Remy Farias de; FERREIRA, José Thales Pantaleão. Uso de resíduos como fonte de nutrientes na agricultura. **Revista Verde** (edição especial), v. 8, n. 5, Mossoró, RN, p. 47- 52, dez., 2013. Disponível em:

<https://www.gvaa.com.br/revista/index.php/RVADS/article/view/2173/2110>

SISINNO, Cristina Lúcia Silveira; SAUTTER, Klaus Dieter; NIVA, Cintia Carla. Ecotoxicologia terrestre e os instrumentos normativos e regulamentadores no Brasil. IN: NIVA, Cintia Carla; BROWN, George Gardner. **Ecotoxicologia terrestre: métodos e aplicações dos ensaios com oligoquetas**. Embrapa, Brasília, DF, p. 71-78, 2019.

SILVA, Leonardo Mendes da. Impactos dos detergents no meio ambiente, evidências de um estudo ecotoxicológico. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, v. 9, n. 2, São Paulo, SP, p. 1429- 1441, fev. 2023.

DOI: <https://doi.org/10.51891/rease.v9i2.8883>

SOUZA, Eduardo Lorensi de; DAMASCENO, Fabiano; SCHIRMER, Guilherme Karsten; RAMIRES, Maiara Figueiredo; BISOGNIN, Ramiro Pereira; BOHRER, Robson Evaldo Gehlen; VASCONCELOS, Marlon de Castro; CEZIMBRA, Julio Cesar Grasel. Resíduos contaminantes no solo: possibilidades e consequências. *R. Gestão e Sustentabilidade Ambiental*, v. 7, n. 2, Florianópolis, SC, p. 484-509, dez.-jul., 2019. DOI: 10.199177/rgsa.v7e22018465-483

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização de bioassólido da indústria papeleira e cinzas de biomassa provenientes da indústria de geração de energia em formulações de substratos para produção de mudas florestais é viável. No entanto, a definição da dose deve ser avaliada criteriosamente, pois estes materiais além de proporcionar alterações nas características físicas e químicas dos substratos podem conter teores elevados de elementos traço. Tais fatores podem reduzir a qualidade das mudas e afetar negativamente os organismos edáficos e as espécies vegetais nas áreas de plantio.

Com base nas análises físicas, químicas, morfológicas e ecotoxicológicas realizadas neste estudo, e considerando a formulação de substrato utilizada (casca de pinus compostada, casca de arroz carbonizada e 15% de cinzas), recomenda-se a dose de 15% de bioassólido da indústria papeleira para a produção de mudas de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden.