



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS DO SOLO  
CURSO DE AGRONOMIA**

**RENAN GOMES COSTA**

**DESENVOLVIMENTO INICIAL DE LEGUMINOSA EM SOLO DEGRADADO  
TRATADO COM RESÍDUOS ORGÂNICOS E BIOCARVÃO**

**FORTALEZA  
2024**

RENAN GOMES COSTA

DESENVOLVIMENTO INICIAL DE LEGUMINOSA EM SOLO DEGRADADO  
TRATADO COM RESÍDUOS ORGÂNICOS E BIOCARVÃO

Monografia apresentada ao curso de Agronomia do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Ceará, como parte das exigências da disciplina de trabalho de conclusão de curso para a obtenção do título de Engenheiro Agrônomo.

Orientadora: Prof. Dra. Mirian Cristina Gomes Costa

Coorientador:MSc. John Lennon Vasconcelos Fonteles

FORTALEZA

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

C875d Costa, Renan Gomes.

Desenvolvimento inicial de leguminosa em solo degradado tratado com resíduos orgânicos e biocarvão /  
Renan Gomes Costa. – 2024.

61 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências  
Agrárias, Curso de Agronomia, Fortaleza, 2024.

Orientação: Profa. Dra. Mirian Cristina Gomes Costa.

Coorientação: Prof. Me. John Lennon Vasconcelos Fonteles.

1. Reflorestamento. 2. Fertilidade do solo. 3. Condicionador de solo. 4. Pirólise. I. Título.

CDD 630

---

RENAN GOMES COSTA

DESENVOLVIMENTO INICIAL DE LEGUMINOSA EM SOLO DEGRADADO  
TRATADO COM RESÍDUOS ORGÂNICOS E BIOCARVÃO

Monografia apresentada no curso de Agronomia do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Ceará, como parte das exigências da disciplina de trabalho de conclusão de curso para a obtenção do título de Engenheiro Agrônomo.

Aprovada em: 16/09/2024

BANCA EXAMINADORA

---

Profª. Dra. Mirian Cristina Gomes Costa (Orientadora)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

MSc. John Lennon Vasconcelos Fonteles (Coorientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Dra. Rafaela Batista Magalhães  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Dr. Rafael Santiago da Costa  
Cagece

A Deus, a todos os meus amigos que fiz durante o curso e aos meus pais Manoel Costa e Francisca Celia, que me deram suporte e agiram com muita paciência nesses 6 anos de curso, em especial, minha mãe que muitas vezes lavou todas as minhas roupas nesse período, sei quanto esse trabalho é difícil e não compensatório.

## AGRADECIMENTOS

A Deus e Nossa Senhora, por me proporcionarem saúde, força e discernimento nas minhas escolhas que muitas vezes foram difíceis para ir em busca dos meus sonhos.

Aos meus pais, Francisca Celia e Manoel Costa, aos meus irmãos, Raiane e Rui Zetty, que estavam sempre em convivência comigo ao longo dessa jornada, me apoiando e suportando em alguns dos meus desafios.

À minha companheira de vida, Thais Freitas, por, diariamente, me motivar, apoiar bastante e suportar todas as minhas aflições e duvidas em todos esses anos de curso.

À Universidade Federal do Ceará, pelo ensino público e de qualidade.

À professora Dra. Mirian Cristina, por todo auxílio, pela grande paciência e por ser uma excelente orientadora e professora.

Ao MSc. John Lennon Vasconcelos Fonteles pela coorientação, pela amizade, conselhos de vida, ajuda nas análises e o apoio na condução desse trabalho.

À Deyse Maia, por todo seu amor e dedicação com os alunos no Laboratório de Manejo do Solo.

Aos meus amigos do Laboratório de Manejo do Solo, José Lucas, Rafaela Batista, Ana Maria, Gleiciane Silva, Iris Peixoto, Mario Neto e Vitória Ricarte pela paciência, amizade, nas dúvidas respondidas durante a condução do experimento e auxílio na desinstalação do mesmo.

Aos meus amigos que fiz durante a graduação, Emanuel Magalhães, Erika Beatriz, Bianca Alves, Gabriel Greca, Ítalo Magalhães, Ivan Abreu, João Ivo, Lenildo Melo, Leslyene Freitas, Matheus Medeiros, Nicole Ferreira, Ramony Kelly e tantos outros que fiz, mas não me recordo o nome, que compartilharam comigo momentos de alegrias e tristezas a longo destes seis anos e fizeram com que essa jornada fosse mais leve.

À Diretoria Florestal da Semace por ter me dado a primeira oportunidade de estagiar e fornecer o primeiro contato com a agricultura no Ceará mesmo que por um curto período.

A todos da Asseng Engenharia e Meio ambiente por me conceder meu segundo estágio onde aprendi outros ramos pouco explorados do meu curso e ter feito abrir a mente as várias oportunidades que um curso tão complexo pode oferecer.

À ABC Agrícola por ter me dado minha terceira oportunidade de estágio onde pude vivenciar muitas experiências novas e aprender na prática o que é ser engenheiro agrônomo e suas várias funções dentro de uma fazenda, em especial ao Fredson Soares por ter sido meu orientador no tempo em que estive lá, compartilhando saberes e sanando minhas dúvidas.

À Agência Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), pelo apoio financeiro à pesquisa (Processo nº 0122017200).

À Companhia de Água e Esgoto do Estado do Ceará (CAGECE) e Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) pelo apoio financeiro à pesquisa (Processo 06670855/2021).

Ao Programa Cientista-Chefe em Agricultura, do Governo do Estado do Ceará (Acordo 14/2022 SDE/ADECE/FUNCAP, Processo 08126425/2020/FUNCAP) pelo apoio financeiro para a realização da pesquisa.

Ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Agricultura Sustentável no Semiárido Tropical (INCT-AgriS) pelo apoio financeiro à pesquisa (PROCESSO CNPQ/INCT: 406570/2022-1)

A todos de que alguma forma contribuíram e incentivaram a realização deste trabalho, sou eternamente grato!

“O desenho de nossas vidas, como a chama da vela, é continuamente conduzido em novas direções por diversos eventos aleatórios que, juntamente com nossas reações a eles, determinam nosso destino. Como resultado, a vida é ao mesmo tempo difícil de prever e de interpretar.” (LEONARD MLODINOW, 2009)

## RESUMO

Nas últimas décadas, políticas públicas de mitigação dos danos da degradação ao meio ambiente e reciclagem/reutilização foram introduzidas para reduzir as quantidades de resíduos gerados e promover a recuperação de solos degradados. A utilização de resíduos orgânicos vem ganhando notoriedade na revegetação desses solos. O lodo de esgoto doméstico é uma opção promissora como condicionador de solos para reflorestamento de áreas degradadas, pois contém nutrientes que são benéficos para as plantas. No entanto, também pode conter elementos potencialmente tóxicos. A copirólise do lodo com outra biomassa, resultando em um biocarvão, pode concentrar nutrientes e reduzir a presença desses elementos tóxicos. Porém, ainda há incertezas sobre o tipo e quantidade ideal de resíduo a ser utilizado nesse processo. Neste estudo o objetivo foi avaliar o crescimento da *Mimosa caesalpiniaefolia* cultivada em solo degradado, em resposta a doses de biocarvão e dos resíduos precursores do biocarvão. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, em delineamento inteiramente casualizado, com esquema fatorial 3 x 4, mais um tratamento controle e 4 repetições, totalizando 52 unidades experimentais. O primeiro fator de tratamento foi constituído por: lodo de esgoto + resíduo de poda (LP), lodo de esgoto (LE) e biocarvão de LE + resíduo de poda (B-LP). O segundo fator de tratamento foram as doses 5, 10, 20 e 40 Mg ha<sup>-1</sup> de biocarvão, 10,4; 20,8; 41,5 e 83,1 Mg ha<sup>-1</sup> para o lodo de esgoto e 17,5; 35,1; 70,2 e 140,3 Mg ha<sup>-1</sup> para a mistura. O controle foi a dose zero. Solo degradado foi incubado com os tratamentos para posterior semeadura de *M. caesalpiniifolia*. Foram avaliados: número de folhas, altura da planta e diâmetro do caule. Aos 76 dias após a semeadura as plantas foram colhidas para análise da massa seca total. Foi calculado o Índice de Qualidade de Dickson para avaliar a qualidade das mudas. Foi realizada a ANOVA, teste de Tukey, teste de regressão e teste de Dunnet, empregando o software R. O B-LP não teve impacto significativo no desenvolvimento inicial de *M. caesalpiniaefolia* para a maioria dos parâmetros, exceto na matéria seca total na dose 4 (40 Mg ha<sup>-1</sup>). Doses crescentes de lodo de esgoto mostraram resultados mistos: enquanto altas doses prejudicaram o desenvolvimento das mudas, doses até 70,2 Mg ha<sup>-1</sup> foram benéficas. A mistura de lodo de esgoto com resíduo de poda, por sua vez, apresentou um aumento de até 352% em relação ao controle na dose 4 (140,03 Mg ha<sup>-1</sup>) para o número de folhas, sugerindo que essa combinação pode melhorar significativamente o crescimento das mudas quando utilizada em doses adequadas.

**Palavras-chave:** Reflorestamento; Fertilidade do solo; condicionador de solo; Pirólise

## ABSTRACT

In recent decades, public policies aimed at mitigating environmental degradation and promoting recycling/reuse have been introduced to reduce the amount of waste generated and to promote the recovery of degraded soils. Domestic sewage sludge is a promising option as a soil conditioner for the reforestation of degraded areas, as it contains nutrients beneficial to plants. However, it may also contain potentially toxic elements. The co-pyrolysis of sludge with other biomass, resulting in biochar, can concentrate nutrients and reduce the presence of these toxic elements. However, there are still uncertainties about the ideal type and quantity of waste to be used in this process. This study aimed to evaluate the growth of *Mimosa caesalpiniaefolia* cultivated in degraded soil in response to doses of biochar and the precursor residues of the biochar. The experiment was conducted in a greenhouse, in a completely randomized design, with a 3 x 4 factorial scheme, plus a control treatment and 4 replications, totaling 52 experimental units. The first treatment factor consisted of sewage sludge + pruning residue (LP), sewage sludge (LE), and biochar from LE + pruning residue (B-LP). The second treatment factor was doses of 5, 10, 20, and 40 Mg ha<sup>-1</sup> of biochar, 10.4; 20.8; 41.5, and 83.1 Mg ha<sup>-1</sup> for sewage sludge, and 17.5; 35.1; 70.2, and 140.3 Mg ha<sup>-1</sup> for the mixture. The control was the zero dose. Degraded soil was incubated with the treatments before sowing *M. caesalpiniaefolia*. The following were evaluated: number of leaves, plant height, and stem diameter. At 76 days after sowing, the plants were harvested for analysis of total dry mass. The Dickson Quality Index was calculated to assess seedling quality. ANOVA, Tukey test, regression analysis, and Dunnet test were performed using the R software. B-LP had no significant impact on the initial development of *M. caesalpiniaefolia* for most parameters, except for total dry matter at dose 4 (40 Mg ha<sup>-1</sup>). Increasing doses of sewage sludge showed mixed results: while high doses impaired seedling development, doses up to 70.2 Mg ha<sup>-1</sup> were beneficial. The mixture of sewage sludge with pruning residue, in turn, showed an increase of up to 352% compared to the control at dose 4 (140.03 Mg ha<sup>-1</sup>) for the number of leaves, suggesting that this combination can significantly improve seedling growth when used at adequate doses.

**Keywords:** Reforestation; Soil fertility; Soil conditioner; Pyrolysis.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Área localizada no núcleo de desertificação de Irauçuba (CE) onde foi coletado o Planossolo utilizado neste estudo.....	26
Figura 2 – Distribuição dos vasos na casa de vegetação do departamento de Ciências do Solo da UFC – Campus do Pici.....	31
Figura 3 - Mistura das doses dos tratamentos nos sacos plasticos para posterior deposição nos vasos.....	32
Figura 4 – Vaso com três sementes de <i>M. Caesalpiniifolia</i> .....	33
Figura 5 – Irrigação de cada tratamento até atingir 70% da capacidade de campo.....	33
Figura 6 – Armadilha para insetos pragas .....	34
Figura 7 – Folhas compostas pinadas, alternadas, com uma pina de 2 pares de folíolos obovado por folha .....	34
Figura 8 – Lavagem das raízes com água destilada.....	35
Figura 9 - Médias do número de folhas de <i>Mimosa caesalpiniifolia</i> para o desdobramento da interação entre os materiais orgânicos biocarvão de lodo de esgoto e resíduo de poda de cajueiro (B-LP), lodo de esgoto (LE) e mistura de lodo de esgoto e resíduo de poda de cajueiro (LP) comparadas pelo teste de Tukey (A) a 5% de significância (A) e curvas de regressão em respostas às doses dos materiais aplicados (B). ....	37
Figura 10 - Médias da altura da planta (cm) de <i>Mimosa caesalpiniifolia</i> para o desdobramento da interação entre os materiais orgânicos biocarvão de lodo de esgoto e resíduo de poda de cajueiro (B-LP), lodo de esgoto (LE) e mistura de lodo de esgoto e resíduo de poda de cajueiro (LP) comparadas pelo teste de Tukey (A) a 5% de significância (A) e curvas de regressão em respostas às doses dos materiais aplicados (B).....	38
Figura 11 - Médias do diâmetro do caule (mm) de <i>Mimosa caesalpiniifolia</i> para o desdobramento da interação entre os materiais orgânicos biocarvão de lodo de esgoto e resíduo de poda de cajueiro (B-LP), lodo de esgoto (LE) e mistura de lodo de esgoto e resíduo de poda de cajueiro (LP) comparadas pelo teste de Tukey (A) a 5% de significância (A) e curvas de regressão em respostas às doses dos materiais aplicados (B). .....	40
Figura 12 - Médias matéria seca total (g) de <i>Mimosa caesalpiniifolia</i> para o desdobramento da interação entre os materiais orgânicos biocarvão de lodo de esgoto e resíduo de poda de cajueiro (B-ILP, lodo de esgoto (LE) e mistura de lodo de esgoto e resíduo de poda de cajueiro (LP) comparadas pelo teste de Tukey (A) a 5% de significância (A) e curvas de regressão em respostas às doses dos materiais aplicados (B).....	41

Figura 13 - Médias do índice de qualidade de dickson de *Mimosa caesalpiniifolia* para o desdobramento da interação entre os materiais orgânicos biocarvão de lodo de esgoto e resíduo de poda de cajueiro (B-LP), lodo de esgoto (LE) e mistura de lodo de esgoto e resíduo de poda de cajueiro (LP) comparadas pelo teste de tukey (A) a 5% de significância (A) e curvas de regressão em respostas às doses dos materiais aplicados (B). ..... 43

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Atributos físicos e químicos para caracterização da camada de 0-20 cm do solo coletado em irauçuba para a realização do experimento (com desvios padrão entre parênteses).....	27
Tabela 2- Atributos físico-químicos do lodo de esgoto (LE) e da mistura de lodo de esgoto com resíduo de poda de cajueiro utilizados como biomassa para produção do biocarvão a ser utilizado neste estudo (com desvios padrão entre parênteses).....	29
Tabela 3- Atributos analisados na caracterização do biocarvão de lodo de esgoto e resíduo de poda de cajueiro (com desvios padrão entre parênteses). .....	30
Tabela 4 – Quantidade de doses de biomassas utilizadas nos tratamentos.....	32
Tabela 5- Resumo da análise de variância (Anova) para número de folhas, altura, diâmetro do caule, matéria seca total e índice qualidade de Dickson (IQD) da espécie <i>M. Caesalpiniaefolia</i> em função de resíduos orgânicos e doses. .....	36
Tabela 6 - Reste de Dunnett para o desdobramento das médias da interação dos resíduos orgânicos e doses para as variáveis número de folhas (adimensional), altura da planta (cm), diâmetro do caule (mm), matéria seca total (g) e índice de qualidade de Dickson (IQD adimensional) da <i>M. Caesalpiniaefolia</i> em resposta ao biocarvão de lodo de esgoto e resíduo de poda de cajueiro (B-LP), lodo de esgoto (LE) e mistura de lodo de esgoto com resíduo de poda de cajueiro (LP) comparados ao tratamento controle.....	44

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASD	Áreas Suscetíveis à Desertificação
CAD	Capacidade de Água Disponível
ASTM	American Society for Testing Material
B-LP	Biocarvão produzido pela copirólise de lodo de esgoto e resíduo de poda de cajueiro
Cagece	Companhia de Água e Esgoto do Ceará
CC	Capacidade de Campo
CE	Condutividade Elétrica
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CRA	Capacidade de Retenção de água
CTC	Capacidade de Troca de Cátons
ETAR	Estação de tratamento de águas resíduais
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
FAO	Food and Agricultural Organization
FDA	Fibra em Detergente Ácido
FDN	Fibra em Detergente Neutro
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDI	Interface de desenvolvimento interativa
IQD	Índice de qualidade de Dickson
LE	Lodo de Esgoto
LP	Mistura de Lodo de esgoto mais Poda de cajueiro
MF	Massa Fresca
MSPA	Massa seca da parte aérea
MSR	Massa seca da Raiz
MST	Massa seca total
PMP	Ponto de Murcha Permanente
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
TN	Nódulos totais
UASB	Upflow Anaerobic Sludge Blanket
UFC	Universidade Federal do Ceará

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>18</b>
<b>2.1 Degradação do solo.....</b>	<b>18</b>
<b>2.2 Revegetação de solo degradado .....</b>	<b>19</b>
<b>2.3 Resíduos orgânicos para a recuperação de solo degradado .....</b>	<b>21</b>
<b>2.3.1 Lodo de esgoto .....</b>	<b>21</b>
<b>2.3.2 Biocarvão .....</b>	<b>23</b>
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>25</b>
<b>3.1 Solo utilizado e área experimental .....</b>	<b>25</b>
<b>3.1.1 Local da coleta de solo.....</b>	<b>25</b>
<b>3.1.2 Caracterização do solo utilizado .....</b>	<b>26</b>
<b>3.1.3 Produção e caracterização das biomassas precursoras do biocarvão .....</b>	<b>28</b>
<b>3.1.4 Produção e caracterização do biocarvão de LE e poda do cajueiro .....</b>	<b>29</b>
<b>3.2 Delineamento experimental e tratamentos.....</b>	<b>31</b>
<b>3.3 Instalação e condução do experimento .....</b>	<b>31</b>
<b>3.4 Avaliações e análises.....</b>	<b>34</b>
<b>3.4.1 Desenvolvimento das mudas.....</b>	<b>34</b>
<b>3.4.2 Análises estatísticas. .....</b>	<b>36</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>36</b>
<b>4.1 Resumo da Anova para as variáveis analisadas .....</b>	<b>36</b>
<b>4.2 Teste de Tukey e análise de regressão para as variáveis analisadas.....</b>	<b>37</b>
<b>4.2.1 Número de folhas.....</b>	<b>37</b>
<b>4.2.2 Altura da planta .....</b>	<b>38</b>
<b>4.2.3 Diâmetro do Caule.....</b>	<b>39</b>
<b>4.2.4 Matéria Seca Total.....</b>	<b>41</b>
<b>4.2.5 Índice de Qualidade de Dickson (IQD) .....</b>	<b>42</b>
<b>4.3 Teste de Dunnet para as variáveis analisadas.....</b>	<b>44</b>
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>46</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>47</b>
<b>ANEXO A - AUTORIZAÇÃO DE PUBLICAÇÃO CONCEDIDA PELO FINANCIADOR DO PROJETO DE PESQUISA QUE DEU ORIGEM À MONOGRAFIA .....</b>	<b>61</b>

## 1 INTRODUÇÃO

No contexto em que as discussões ambientais vêm ganhando notoriedade no meio científico, o Brasil vem passando por severos problemas atuais como a degradação do solo. Essa degradação impacta negativamente a produtividade agrícola, a preservação dos recursos naturais e a manutenção dos serviços ecossistêmicos essenciais para a vida humana e a biodiversidade. A degradação do solo é um processo complexo decorrente da interação de vários fatores físicos, biológicos e químicos, muitos dos quais são exacerbados pelas atividades humanas.

No Brasil, há extensas áreas em processo de degradação de terras que estão em processo de desertificação, afetando áreas extensas do semiárido nordestino, incluindo o estado do Ceará. Diante desse cenário desafiador, a revegetação de solos degradados surge como uma estratégia necessária e promissora para restaurar a saúde do solo e promover a sustentabilidade ambiental.

A utilização de espécies nativas, como a *Mimosa caesalpiniaefolia* Benth., popularmente conhecida como sabiá, destaca-se por sua adaptabilidade às condições climáticas adversas do semiárido e pelo seu potencial em melhorar as propriedades do solo. Porém, diante da degradação química dos solos e das severas limitações hídricas dos núcleos de desertificação, pode ser fundamental utilizar estratégias complementares que potencializem a revegetação do solo degradado. Nesse contexto, se insere a aplicação de resíduos orgânicos que funcionem como condicionadores de solo.

O lodo de esgoto doméstico é promissor para uso como condicionador de solos para reflorestamento de áreas degradadas. É um material que possui elementos químicos que são nutrientes para as plantas, mas pode apresentar também considerável quantidade de elementos químicos potencialmente tóxicos. Assim, surgiu a possibilidade de se fazer a copirólise do lodo de esgoto com uma segunda biomassa, visando concentrar elementos químicos que sejam nutrientes para as plantas e reduzir a disponibilidade dos elementos potencialmente tóxicos. Contudo, há dúvidas sobre o tipo e a quantidade de resíduo que seriam mais favoráveis ao desenvolvimento inicial de espécies perenes como a *M. caesalpiniaefolia* em solo degradado.

Este estudo foi realizado para investigar as seguintes hipóteses:

- 1) O biocarvão produzido a partir da copirólise de lodo de esgoto e resíduo de poda de cajueiro é mais favorável ao desenvolvimento inicial da *M. caesalpiniaefolia* quando comparado ao lodo de esgoto e resíduo de poda não pirolisados

2) Doses crescentes dos biocarvões, da mistura de lodo de esgoto com resíduo de poda de cajueiro e do lodo de esgoto sem pirólise favorecem o desenvolvimento inicial de *M. caesalpiniaefolia*.

O presente estudo teve por objetivos: avaliar atributos de crescimento da *M. caesalpiniaefolia* cultivada em solo degradado em resposta à doses de biocarvão e dos resíduos precursores do biocarvão.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Degradção do solo

Os solos fornecem serviços ecossistêmicos que atendem às necessidades humanas, tais como, serviços de fornecimento de alimento por meio das plantas cultivadas, suporte físico para espécies arbóreas, diminuição de enchentes, filtragem de nutrientes, armazenamento de carbono, desintoxicação e reciclagem de resíduos, regulação de pragas e doenças, recreação, estética, valores patrimoniais e identidade cultural (DOMINATI *et al.*, 2014). Quando se fala de produção de alimentos, a FAO estima que 95% da produção global de alimentos são dependentes do solo e um terço do solo no mundo já está degradado (FAO, 2022).

A degradação do solo implica na deterioração das características do terreno ligadas à agricultura, preservação da infraestrutura e qualidade dos recursos naturais (LAL, 2001). Ela se manifesta por meio de diversos processos físicos, biológicos e químicos provocados pelas ações humanas, de maneira direta ou indireta. Aproximadamente 60% da extensão territorial global é categorizada como degradada, e a degradação do solo, abarcando a erosão do terreno, representa um dos principais obstáculos para os responsáveis pela agricultura (PIMENTEL, 2006).

O Brasil, com sua área de mais de 8 milhões de quilômetros quadrados (IBGE, 2022) possui cerca de 1,3 milhões de quilômetros quadrados em processo de desertificação, tornando o solo ainda mais degradado, essa área abrange cerca de 15% do território nacional, onde aproximadamente 1488 municípios são pertencentes ao semiárido brasileiro (CAVALCANTI *et al.*, 2011). No Ceará, 11,45% de seu território estão degradados em decorrência da desertificação. As regiões do médio Jaguaribe, Inhamuns e parte do centro-norte, onde fica localizado Irauçuba e seus circunvizinhos, são as mais afetadas (FUNCENE, 2018). Irauçuba apresenta fragilidade ambiental significativa, com grande vulnerabilidade à degradação e desertificação. Isso se deve ao seu período chuvoso com baixas precipitações, longo período de estiagem, que ocasiona um déficit hídrico negativo, além de solos pouco profundos e pedregosos (BARBOSA; DE OLIVEIRA, 2022).

A ocupação e produção do espaço geográfico, devido ao avanço da colonização, foram fatores que impulsionaram a fixação e a afirmação de povos não originários no semiárido cearense. Diferentes formas de uso e ocupação do solo, ao longo de vários anos, associadas às necessidades imediatas e aos modos de agricultura de subsistência, pecuária extensiva e o extrativismo vegetal desses povos, conduziram o Ceará à degradação dos seus ambientes. A soma dessas atividades agrícolas insustentáveis junto aos fatores das condições físi-

climáticas do Nordeste brasileiro, fez com que áreas como Irauçuba e seu entorno fossem classificadas como Áreas de Suscetíveis Degradação (ASD) (FACUNDO *et al.*, 2020).

Quando se explora a problemática dos solos degradados, nos deparamos com um cenário preocupante de perda da biodiversidade e da fertilidade do solo, além dos prejuízos em seus atributos físicos. A revegetação desses solos é uma solução necessária e promissora em meio a esses desafios. Essa solução apresenta não apenas uma abordagem de conservação ambiental, mas também uma oportunidade de revitalizar ecossistemas e promover sustentabilidade em longo prazo.

## **2.2 Revegetação de solo degradado**

A revegetação é o processo de reintroduzir vegetação em áreas degradadas para restaurar a cobertura vegetal, melhorar a qualidade do solo e aumentar a biodiversidade. Ela é essencial na restauração de áreas degradadas pelo uso humano, incluindo atividades de mineração, pecuária intensiva, e no combate ao problema ambiental da erosão do solo, perda de nutrientes e biodiversidade. Por isso, é preciso salientar que a seleção criteriosa de espécies vegetais para a prática é fundamental para a recuperação bem-sucedida (SOUZA *et al.*, 2023).

Uma das principais dificuldades na revegetação de solos degradados são problemas edáficos, falta de nutrientes, compactação do solo, pouca capacidade de armazenamento de água e resistência ao desenvolvimento de raízes mostram como é difícil o desenvolvimento de espécies nativas após a interferência humana (MOREIRA, Paulo Roberto, 2004). Atrelado a isso, a região semiárida do Brasil se destaca pela falta de reservas naturais de água e pela imprevisibilidade sazonal e anual das chuvas, sendo reconhecida por períodos de seca recorrentes (BRASIL NETO *et al.*, 2021). A disponibilidade de água é um fator limitante no processo de revegetação, pois desempenha um papel crucial na determinação da eficácia do funcionamento de diferentes ecossistemas (MARIANO *et al.*, 2018).

Pesquisas recentes mostram que a adição de resíduos orgânicos pirolisado a certa temperatura ao solo pode melhorar características físicas e químicas do mesmo, bem como favorecer a capacidade de retenção de água (CRA), capacidade de troca de cátions (CTC) indicando um ótimo meio para a revegetação de solos degradados (ABEL *et al.*, 2013; AGEGNEHU; SRIVASTAVA; BIRD, 2017; DA SILVA, 2022).

A fauna edáfica responde rapidamente ao processo de revegetação em solos degradados, mostrando uma grande diversidade nas comunidades associadas à revegetação. Em plantios mais antigos, a comunidade de microrganismos do solo apresenta uma estrutura mais definida em comparação aos processos de revegetação recentes. (CORREIA *et al.*, 2020).

É essencial utilizar espécies nativas das respectivas áreas em que se deseja revegetar, pois elas já estão adaptadas ao clima e as condições do local. Com isso, aumenta-se as chances de sobrevivência da planta, mesmo com condições de solo que não são ideais para o seu desenvolvimento (MACHADO *et al.*, 2014).

Como preferência de espécies nativas para a revegetação de solos degradados se destacam as leguminosas, sua simbiose dos nódulos radiculares possibilita que as leguminosas se desenvolvam em solos com baixo teor de nitrogênio (YANG *et al.*, 2022). Além de fornecer nitrogênio fixado ao sistema agrícola, as leguminosas contribuem para a solubilização do fósforo (P) insolúvel no solo, aumentam a atividade microbiana, melhoram as condições físicas do solo, restauram a matéria orgânica e ajudam a controlar as ervas daninhas (GILLER, 2001; STAGNARI *et al.*, 2017), além disso, as leguminosas arbóreas contribuem para a recuperação do solo mantendo uma baixa relação C/N e pela ação das raízes na deposição de folheados e sementes (FRANCO *et al.*, 1992).

Uma das espécies arbóreas conhecidas no Ceará é a *Mimosa caspiaefolia* Benth., pertencente à família Fabaceae (ou Leguminosae) e subfamília Mimosaceae. Devido a cor da sua casca se assemelhar com a plumagem do pássaro sabiá, a planta é conhecida popularmente pelo mesmo nome (CARVALHO, 2007). Uma árvore que pode facilmente chegar aos seus 9,0 m de altura, muito presente nos sertões nordestinos de alta a baixa altitude do Ceará, onde predominam Latossolos, Argissolos, Luvissolos Crônicos Órticos e Planossolos Háplicos. Seu sistema radicular é lateral, com caule espinhoso, lenho poroso e pesado (ARAÚJO FILHO, 2013).

Como madeireira, seu uso é diversificado para a produção de estacas, portas, mourões, lenha e carvão. As estacas são amplamente utilizadas pois, mesmo sem nenhum tipo de tratamento, apresentam vida útil acima de 20 anos. Os plantios de sabiá com mais de 5 anos de idade chegam a produzir cerca de 5000 estacas/ ha. A espécie apresenta boa capacidade de desenvolvimento vegetativo em temperaturas altas (20 a e 30 °C) e em áreas com pluviosidade anual média entre 315 a 240 mm (PAREYN *et al.*, 2018).

A espécie possui baixa exigência de fertilidade e umidade do solo, porém, a planta precisa de uma suplementação proveniente do solo para seu adequado desenvolvimento (CARVALHO, 2007). A utilização de resíduos orgânicos para melhorar a fertilidade do solo e, assim, aumentar a disponibilidade de nutrientes para as plantas é de conhecimento antigo (HOWARD, 1935).

É fundamental considerar estratégias complementares que potencializem o processo de recuperação ambiental do solo degradado, uma vez que a ausência de um condicionador de

solo prejudica o desenvolvimento de espécies arbóreas, como o sabiá (MAIA *et al.*, 2023). Nisso, o uso de resíduos orgânicos em solos degradados emerge como uma abordagem promissora e complementar, que se mostra uma solução global e sustentável para a restauração ambiental e promove a biodiversidade.

### **2.3 Resíduos orgânicos para a recuperação de solo degradado**

Há diferentes resíduos orgânicos que podem ser usados na recuperação de solos degradados, dentre os quais estão os resíduos dos serviços de saneamento (MEDINA *et al.*, 2015). Esses resíduos incluem todas as substâncias geradas durante o fornecimento de água potável, o tratamento de esgoto sanitário e o gerenciamento das águas pluviais (MMA, 2020).

Segundo dados do Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento (SNIS), em 2020, a infraestrutura de saneamento básico no Brasil alcançou 55% da população com os serviços de tratamento de esgoto, beneficiando 114,6 milhões de cidadãos. Entretanto, dos resíduos orgânicos gerados no mesmo ano, apenas 50,8% passaram por tratamento adequado (BRASIL, 2021).

A Política Nacional de Resíduos Sólidos define resíduos sólidos como materiais descartados resultantes de atividades humanas, que precisam de destinação adequada, incluindo sólidos, semissólidos, gases contidos em recipientes e líquidos que não podem ser descartados na rede pública de esgotos ou em corpos d'água devido à inviabilidade técnica ou econômica. Esses resíduos também são gerados no tratamento de esgoto sanitário (BRASIL, 2010).

#### **2.3.1 Lodo de esgoto**

O lodo de esgoto pode ser doméstico, proveniente de residências, ou industrial, vindo de rejeitos industriais, e o tratamento de ambos pode ser dividido em primário e secundário, sendo que no tratamento do lodo doméstico, o lodo primário é extraído do tanque de sedimentação das estações de tratamento de águas residuais (ETARs) e contém muitas partículas orgânicas e inorgânicas (LI *et al.*, 2024).

Enquanto o lodo ativado residual (secundário) é removido do tanque de tratamento biológico, onde microrganismos decompõem a matéria orgânica, e o lodo primário possui altos níveis de sólidos suspensos voláteis, gorduras/óleos/graxas e nitrogênio, ao passo que o lodo ativado residual tem mais biomassa microbiana, menor quantidade de sólidos suspensos voláteis e alta concentração de fósforo (LI *et al.*, 2024).

O lodo de esgoto industrial é um subproduto produzido em estações de tratamento de esgoto, sendo uma mistura gelatinosa de sólidos e líquidos resultante do processo de tratamento de águas residuais em instalações industriais. Esse lodo pode ser classificado em lodo primário

e lodo secundário, sendo o primeiro obtido por processos de sedimentação e precipitação química, enquanto o segundo é derivado de biomassa ativada que passou por tratamento biológico. O lodo de esgoto industrial pode conter uma variedade de produtos químicos suspensos, tornando-o potencialmente perigoso, e requer tratamento adequado para evitar impactos ambientais negativos antes de ser descartado (KULKARNI *et al.*, 2024).

O lodo proveniente do tratamento de esgoto possui potencial para servir como fonte de calor e energia, ajudando a mitigar os danos ambientais ao reduzir a demanda por materiais e energia de outras fontes (GAO *et al.*, 2020). Além disso, o lodo de esgoto tem uso agronômico, sendo utilizado principalmente como condicionador de solo, aumentando a matéria orgânica, os nutrientes e o pH. As plantas adubadas com lodo de esgoto mostram uma maior transferência de macronutrientes para as partes aéreas, o que resulta em uma condutividade estomática maior (MOREIRA, Rodrigo Santos *et al.*, 2020)

O lodo de esgoto também pode ser utilizado para revegetar solos degradados pela mineração, elevando a produtividade e melhorando as propriedades químicas e físicas do solo ao longo dos anos (HALECKI; KLATKA, 2021). Além disso, o lodo melhora a atividade das enzimas fosfatases e urease com uma única aplicação, quando misturado com gramíneas, promovendo uma recuperação permanente (MYSZURA-DYMEK; ŹUKOWSKA, 2023).

Entretanto, esse resíduo também pode conter elementos inorgânicos nocivos, capazes de gerar consequências adversas para o meio ambiente, seres humanos e animais que eventualmente entrem em contato, além de conter agentes patogênicos que precisam ser reduzidos a níveis seguros para a saúde humana(BITTENCOURT; AISSE; SERRAT, 2017).

No Brasil, a resolução CONAMA 498/2020 é o conjunto de diretrizes em vigor que promoveu revisões em relação à legislação de 375/2006 e 380/2009, destacando-se a distinção entre resíduos sólidos e biossólidos como uma das principais modificações. O biossólido é descrito como o resultado do tratamento do lodo de esgoto que cumpre com os padrões microbiológicos e químicos definidos pela resolução. Além disso, houve mudanças em relação à utilização do lodo de esgoto derivado do tratamento de resíduos industriais, agora exigindo uma autorização do órgão ambiental competente (BRASIL, 2020).

De acordo com a resolução CONAMA, os biossólidos são classificados como Classe A ou B com base no limite máximo de *Escherichia coli* (106 por grama de sólidos totais) e na implementação de procedimentos de redução de patógenos. Para uso no solo, são categorizados como Classe 1 ou 2, de acordo com os limites máximos de substâncias químicas (como arsênio, cádmio, chumbo, etc.). Com base nessa classificação, são estabelecidas as taxas máximas anuais e a carga máxima acumulada dessas substâncias no solo. Há também restrições e

permissões específicas para a aplicação dos biossólidos, considerando o tipo de cultura, o período de aplicação e a classe dos biossólidos. (BRASIL, 2020)

Dentre esses elementos inorgânicos, o lodo de esgoto pode conter a presença de elementos potencialmente tóxicos como Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Pb e As, que podem vir a ser provocar contaminação para as plantas, o solo, para os adultos e as crianças, podendo ser causadores de doenças cancerígenas, intoxicações e levar a problemas de saúde a de longo prazo (EID *et al.*, 2021; NYASHANU; SHAFODINO; MWAPAGHA, 2023).

Dadas as restrições para a aplicação desse resíduo nos solos, a técnica de pirólise do resíduo surge como uma alternativa favorável não apenas na gestão de fluxos de resíduos e mitigação ambiental, mas também na transição para um sistema de ciclo fechado. Com ela pode-se remover o odor, reduzir o volume, destruir os patógenos, elimina parte dos poluentes presentes no lodo e reduzir a disponibilidade dos resíduos inorgânicos (CHEW *et al.*, 2021; GOLDAN *et al.*, 2022). Essa pirólise irá resultar em um bio-óleo, biogás e o biocarvão. O carvão vegetal pirogênico derivado do lodo de esgoto, ao contrário do próprio lodo de esgoto, tende a ter um impacto positivo nos solos e nas plantas, confirmando que a conversão do lodo de esgoto em biocarvão é uma forma eficaz de reaproveitar esse resíduo orgânico (GOLDAN *et al.*, 2022).

Entre outras abordagens inovadoras para enfrentar os desafios ambientais e promover práticas sustentáveis, vale ressaltar a utilização de biocarvão, um produto resultante do processo de pirólise, que pode ser empregado como condicionador de solo na recuperação de áreas degradadas. No entanto, quando o lodo de esgoto é utilizado exclusivamente para a produção de biocarvão, há o risco de que o material resultante contenha altos níveis de elementos potencialmente tóxicos. Por isso, uma alternativa promissora é a copirólise do lodo de esgoto com uma segunda biomassa, o que pode mitigar esses riscos e resultar em um biocarvão de melhor qualidade para o uso em solos danificados.

### **2.3.2 Biocarvão**

O biocarvão é uma substância sólida, composta principalmente de carbono, e produzida por meio da pirólise térmica ou gaseificação de matéria orgânica ou biomassa. A pirólise ocorre mediante ausência significativa de oxigênio (CHIOMENTO *et al.*, 2022). O biocarvão pode ser produzido a partir de uma ampla gama de biomassas, resultando em produtos com atributos igualmente diversos. A flexibilidade de empregar diferentes matérias-primas possibilita a exploração da produção de biocarvão utilizando diversas biomassas, como

lodo de esgoto, e avaliar sua adaptabilidade em diferentes ambientes, possibilidades econômicas e agrícolas (FARIAS, 2018).

As propriedades do biocarvão são significativamente influenciadas pela composição física e química da matéria-prima (MUBASHIR *et al.*, 2015). Sua composição química pode ser afetada de acordo com o processo de fabricação. O teor de metais pesados, a temperatura de pirólise, o tempo de processamento e a presença de aditivos pode afetar na sua conversão (FAN *et al.*, 2020; ZOROUFCHI BENIS *et al.*, 2020). Dessa forma, o biocarvão derivado do lodo de é geralmente composto predominantemente por carbono orgânico, além de apresentar teor elevado de cinzas que contêm minerais como cálcio, magnésio, potássio, fósforo, metais e carbonatos inorgânicos (XING; XU; LI, 2021).

O lodo de esgoto (LE) é considerado uma excelente biomassa precursora para a produção de biocarvão, pois tem potencial para aplicações ambientais, melhoria do solo, controle da poluição do ar e sequestro de carbono, além de alta capacidade de adsorção e propriedades químicas rica em estruturas porosas (KHAN *et al.*, 2023). Por esse motivo, a pirólise viabiliza a transformação do lodo de esgoto em um produto de maior valor, como o biocarvão (FEI *et al.*, 2019). Os biocarvões produzidos a partir de lodo de esgoto apresentam elevados níveis de componentes minerais. A aplicação no solo desses biocarvões é uma estratégia promissora para aumentar a fertilidade do solo, liberando nutrientes minerais acessíveis e imobilizando metais pesados (XING; XU; LI, 2021).

Contudo, biocarvão produzido a partir lodo de esgoto apresenta algumas limitações. Uma delas é o risco de contaminação do solo, visto que o próprio lodo de esgoto, como a fonte de matéria prima desse biocarvão, apresenta teores elevados de elementos potencialmente tóxicos, dependendo da sua origem e do processo de tratamento empregado (HAZRATI *et al.*, 2021; WANG, Zhipu; LIU; *et al.*, 2019). A conversão de lodo de esgoto em biocarvão pode elevar a presença de metais pesados como Cu, Zn, Pb, Cr, Mn e Ni devido à concentração de elementos não voláteis na temperatura específica empregada durante o processo de conversão (JIN *et al.*, 2016).

A presença de biocarvão derivado de lodo de esgoto pode reduzir a disponibilidade de metais pesados no solo, devido às mudanças que esse material carbonáceo promove em suas características. Além disso, o biocarvão possui alta afinidade por esses elementos potencialmente tóxicos, o que também pode diminuir a disponibilidade desses elementos no meio ambiente (WANG, Zhipu; LIU; *et al.*, 2019). Sua estrutura porosa, grande superfície específica e grupos químicos ativos facilitam as interações com íons de metais pesados,

formando ligações químicas estáveis que reduzem a biodisponibilidade desses metais para absorção (FIGUEIREDO *et al.*, 2019; SINGH, Simranjeet *et al.*, 2020).

As potencialidades do biocarvão de lodo de esgoto podem ser melhoradas com a adição de outros resíduos para realização da copirólise. A adição de casca de arroz ao lodo de esgoto pirolítico pode reduzir a liberação de hidrocarbonetos e aumentar a quantidade de hidrogênio no biocarvão durante a copirólise. Além disso, a copirólise do lodo de esgoto com casca de arroz promove a carbonização e a formação de compostos aromáticos no biocarvão. Conforme a proporção de casca de arroz aumenta, melhora o desenvolvimento de poros e a área de superfície específica do biocarvão (WANG, Teng *et al.*, 2020).

Uma melhoria semelhante é observada quando se realiza a copirólise do lodo e dos talos de algodão é realizada. Os biocarvões produzidos com uma proporção de mistura alta exibem maior grau de aromaticidade e estruturas porosas mais bem desenvolvidas, tornando-os úteis para a captura de carbono e a mitigação das emissões de gases de efeito estufa. Por outro lado, a redução da proporção de mistura resulta em significativa diminuição nos teores totais de metais pesados dos biocarvões, imobilizando esses metais de maneira ainda mais eficaz (WANG, Zhipu; XIE; *et al.*, 2019).

A adição de biocarvão de lodo de esgoto em solos degradados tem influência positiva nas propriedades do solo. Por exemplo, aumenta o pH, a capacidade de troca de cátions (CTC) e o teor de carbono orgânico do solo, resultando na imobilização das espécies metálicas de Cr, Pb, Cd e Zn. Isso facilita o desenvolvimento das plantas, proporcionando melhor germinação e crescimento das mesmas (MUJTABA MUNIR *et al.*, 2021; PENIDO *et al.*, 2019).

Embora o uso de resíduos orgânicos para melhorar a qualidade do solo seja uma prática comum, há preocupações quanto à eficácia e segurança de diferentes tipos de resíduos, especialmente em solos degradados. A presença de elementos potencialmente tóxicos e a variação na eficácia de diferentes resíduos orgânicos podem impactar o desenvolvimento das plantas. Portanto, o estudo visa avaliar como diferentes dosagens e tipos de resíduos orgânicos incorporados ao solo degradado, influenciam o desenvolvimento de mudas de *M. caesalpiniaefolia*.

### **3 METODOLOGIA**

#### **3.1 Solo utilizado e área experimental**

##### **3.1.1 Local da coleta de solo**

O solo foi coletado no núcleo de desertificação de Irauçuba no Ceará no dia 27/05/2023, em local com as seguintes coordenadas geográficas: 3°44'46"S e 39°47'00"W

(Figura 1). O clima do local onde o solo foi coletado é classificado como tropical quente semiárido (IPECE, 2017).

A retirada do solo foi na camada de 0 – 20 cm. O solo coletado foi colocado em saco de rafia, transportado para Universidade Federal do Ceará (UFC) em Fortaleza (CE) onde foi instalado o experimento na casa de vegetação do Departamento de Ciências do Solo ( $3^{\circ}44'35.6''S$   $38^{\circ}34'33.1''W$ ) com temperatura regulada em 27°C chegando a 35°C nas horas mais quentes do dia e umidade de 80%.

Figura 1 - Área localizada no núcleo de desertificação de Irauçuba (CE) onde foi coletado o Planossolo utilizado neste estudo



Autor: John Fonteles, 2023

### **3.1.2 Caracterização do solo utilizado**

Para a caracterização (Tabela 1), foram coletadas amostras deformadas de solo utilizando trado holandês. A área escolhida foi representativa das características de desertificação, com  $300\text{ m}^2$  aproximadamente. Foram retiradas cinco amostras simples, da camada de 0-20cm, que foram colocadas no mesmo recipiente e homogeneizadas para formar uma mostra composta. Essa amostra composta foi analisada quanto aos atributos químicos físicos e a capacidade de água disponível (CAD) para as plantas.

A caracterização química do solo seguiu os procedimentos descritos no Manual de Métodos de Análise de solo EMBRAPA (TEIXEIRA *et al.*, 2017). O valor do pH foi determinado na proporção 1:2,5 (solo: água), enquanto a condutividade elétrica (CE) foi avaliada no extrato de saturação 1:1 (solo: água). A extração com a solução Mehlich 1 foi empregada nas determinações dos teores de fósforo (P) que foram quantificados or

espectrofotometria, e os elementos Na e K foram quantificados por espectrometria de chama. Fe, Cu, Mn e Zn foram quantificados por meio da espectrometria de absorção atômica. Nas análises de Ca, Mg e Al, a solução extratora de KCl foi utilizada, empregando o método de espectrometria de absorção atômica. A extração da acidez potencial do solo ( $H^+Al$ ) foi realizada com acetato de cálcio e determinada por metodologia volumétrica com solução de NaOH.

A quantificação dos teores de carbono orgânico foi feita através do método Walkley-Black por via úmida em meio ácido ( $H_2SO_4$ ) seguindo os procedimentos descritos no livro Matéria orgânica do solo: Métodos e análises. A titulação foi feita através do dicromato ( $Cr^{6+}$ ) remanescente da oxidação. A quantificação do dicromato foi feita com solução de ferro reduzido em meio ácido, utilizando como indicador o ferroin para a mudança de cor. (MENDONÇA; MATOS, 2005).

Tabela 1 - Atributos físicos e químicos para caracterização da camada de 0-20 cm do solo coletado em Irauçuba para a realização do experimento (com desvios padrão entre parênteses).

<b>Atributos</b>	<b>Unidade</b>	<b>Resultados (0 – 20 cm)</b>
P	$mg\ kg^{-1}$	8,45 ( $\pm 0,03$ )
$Ca^{2+}$	$cmol_c\ kg^{-1}$	6,97 ( $\pm 0,28$ )
$Mg^{2+}$	$cmol_c\ kg^{-1}$	0,46 ( $\pm 0,25$ )
$K^+$	$cmol_c\ kg^{-1}$	0,09 ( $\pm 0,01$ )
$Na^+$	$cmol_c\ kg^{-1}$	0,08 ( $\pm 0,01$ )
$H^+ + Al^3$	$cmol_c\ kg^{-1}$	2,52 ( $\pm 0,26$ )
$Al^{3+}$	$cmol_c\ kg^{-1}$	0,54 ( $> 0,01$ )
CTC efetiva	$cmol_c\ kg^{-1}$	8,14 ( $\pm 0,42$ )
CTC total	$cmol_c\ kg^{-1}$	10,12 ( $\pm 0,65$ )
SB	$cmol_c\ kg^{-1}$	7,60 ( $\pm 0,42$ )
V	%	75,17 ( $\pm 1,13$ )
m	%	6,62 ( $\pm 0,34$ )
CE	$dS\ m^{-1}$	0,03 ( $\pm 0,01$ )
CO org	$g\ kg^{-1}$	6,07
pH	-	5,13 ( $\pm 0,03$ )
$D_s$	$g\ cm^{-3}$	$1.85 \pm 0.16^a$
Areia	%	76,05 ( $\pm 1,39$ )
Argila	%	6,52 ( $\pm 0,10$ )
Silte	%	17,43 ( $\pm 1,46$ )

Classificação textural	-	Areia franca
------------------------	---	--------------

Fonte: Autor, 2024.

A caracterização da densidade do solo das amostras foi obtida de acordo com LIMA *et al.*, (2024) que analisou os atributos físicos do solo no mesmo local da coleta em outubro de 2021. A granulometria do solo foi determinada pelo método da pipeta (EMBRAPA, 1997). A capacidade de água disponível para as plantas foi obtida pela equação 1.

$$CAD = CC - PMP \quad (1)$$

O ponto de baixa tensão (10 kPa) foi usado para se obter a capacidade de campo (CC) foi usado o funil de Haines para estabelecer o equilíbrio entre a tensão aplicada e o conteúdo de água no solo. A placa porosa de Richards foi utilizada para obter o equilíbrio no restante dos pontos (1500 kPa) para se obter o ponto de murcha permanente (PMP) (KLUTE, 1986). A CAD foi determinada para cada tratamento e dose específica.

### **3.1.3 Produção e caracterização das biomassas precursoras do biocarvão**

O biocarvão utilizado neste estudo foi produzido a partir do lodo de esgoto (LE) proveniente de um reator do tipo UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) localizado na Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) Alameda das Palmeiras, que faz parte da Companhia de Água e Esgoto do Ceará (Cagece). O LE foi retirado do leito de secagem 20 dias após a descarga e uma amostra foi coletada para fins de caracterização. A segunda biomassa utilizada para a copirólise foi o resíduo de poda de cajueiro (folhas e galhos), oriundo da ETE Aquiraz, também pertencente à Cagece.

A condutividade elétrica das biomassas foi determinada na proporção de 1:5 (v/v) de água destilada e lido em um condutivímetro (MAPA, 2017). A determinação do pH foi em extrato aquoso na proporção 1:10 (v/v) (ANDRADE; ABREU, 2006). Umidade, Carbono fixo, sólidos voláteis e cinzas foram quantificados através análise imediata de acordo com os métodos descritos em American Society for Testing Material (ASTM, 2013). Para a determinação das quantidades de celulose, hemicelulose e lignina foi feita a diferença entre as frações, seguindo a metodologia de fibra em detergente ácido (FDA), fibra em detergente neutro (FDN) (ROBERTSON; SOEST, 1981) e lignina por oxidação em permanganato de potássio (KMnO<sub>4</sub>) (VAN SOEST, 1967). Os teores do carbono orgânico e do nitrogênio foram quantificados através do analisador elementar (SANTOS *et al.*, 2009). A extração de todos os nutrientes, com exceção do nitrogênio, foi através da digestão seca (SANTOS *et al.*, 2009) para que estivesse disponível para a determinação, K e P por espectrometria de chama, Ca e Mg por absorção atômica (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997). As características das biomassas utilizadas na produção do biocarvão estão detalhadas na Tabela 2.

Tabela 2- Atributos físico-químicos do lodo de esgoto (LE) e da mistura de lodo de esgoto com resíduo de poda de cajueiro utilizados como biomassa para produção do biocarvão a ser utilizado neste estudo (com desvios padrão entre parênteses).

Atributo	Unidade	LE	Mistura
CE	mS cm <sup>-1</sup>	11,23 ( $\pm 0,84$ )	3,16 ( $\pm 0,26$ )
pH	-	5,55 ( $\pm 0,18$ )	5,14 ( $\pm 0,06$ )
Umidade	%	21,80 ( $\pm 2,31$ )	8,03 ( $\pm 0,12$ )
Carbono fixo	%	0,63 ( $\pm 0,70$ )	6,83 ( $\pm 2,78$ )
Sólidos voláteis	%	50,23 ( $\pm 1,63$ )	64,93 ( $\pm 3,07$ )
Cinzas	%	27,33 ( $\pm 1,46$ )	20,20 ( $\pm 0,36$ )
Celulose	%	7,20	15,16
Hemicelulose	%	6,20	12,5
Lignina	%	12,50	23,7
C (orgânico)	dag kg <sup>-1</sup>	32,23 ( $\pm 0,87$ )	37,06 ( $\pm 0,53$ )
N (total)	g kg <sup>-1</sup>	38,84 ( $\pm 2,57$ )	23,96 ( $\pm 4,15$ )
P	g kg <sup>-1</sup>	8,50 ( $\pm 1,16$ )	5,03 ( $\pm 0,58$ )
K	g kg <sup>-1</sup>	2,09 ( $\pm 0,10$ )	1,27 ( $>0,01$ )
Ca	g kg <sup>-1</sup>	21,44 ( $\pm 0,44$ )	13,92 ( $\pm 0,52$ )
Mg	g kg <sup>-1</sup>	9,41 ( $\pm 0,25$ )	6,36 ( $\pm 0,11$ )
Na	mg kg <sup>-1</sup>	1,85 ( $\pm 0,06$ )	0,98 ( $\pm 0,04$ )

Fonte: Autor, 2024.

±: Desvio padrão

### 3.1.4 Produção e caracterização do biocarvão de LE e poda do cajueiro

O biocarvão empregado foi produzido por meio de pirólise a temperatura de 500 °C, mantendo a proporção de 1:1 (massa/ massa) entre o lodo de esgoto (LE) e o resíduo de poda. O material resultante foi caracterizado quanto aos mesmos parâmetros analisados na caracterização das biomassas (Tabela 3). As determinações de Capacidade de Troca Catiônica (CTC), celulose, hemicelulose e lignina seguiram os métodos previamente descritos na caracterização das biomassas (Tabela 2). Contudo, para a lignina utilizou-se determinação em detergente ácido (VAN SOEST; WINE, 1968). O carbono e nitrogênio total foram analisados pelo método de Kjeldahl (COCIONE *et al.*, 2001).

Para a quantificação dos teores de nutrientes nos biocarvões os extratos foram obtidos conforme sugerido em Enders e Lehmann, (2012)- (Modified dry ash). Após extração, o teor de P foi determinado pelo método colorimétrico do Ácido Molibdovândico fosfórico (MAPA, 2017). O teor de P foi estimado em espectrofotômetro a 400nm. Teores de Ca, Mg, Cu, Fe, Mn, Mo, Zn, Al, Cd, Pb e Cr foram analisados por ICP-OES, K e Na por fotometria de chama. CE e pH foram obtidos de acordo com os protocolos descritos em Rajkovich *et al.*, (2012). A análise imediata e determinações de umidade, sólidos voláteis, cinzas e carbono fixo foram conforme métodos descritos em American Society for Testing Material (ASTM, 2013). O equivalente de

carbonato de cálcio (Eq. CaCO<sub>3</sub>) foi determinado pela adição de 0,5M de HCl para a amostra em uma proporção sólido-líquido de 1:20, misturando por 2 h seguido de período de descanso de 16 horas. A suspensão foi então titulada para pH 7 com NaOH 0,5 M (SINGH, Balwant; ARBESTAIN; LEHMANN, 2017).

Tabela 3- Atributos analisados na caracterização do biocarvão de lodo de esgoto e resíduo de poda de cajueiro (com desvios padrão entre parênteses).

Atributos	Unidade	Biocarvão
CTC	mmol <sub>c</sub> /kg	108,62 ( $\pm 2,83$ )
CE	mS/cm	0,8 ( $\pm 0,1$ )
pH	-	9,1 ( $\pm 0,1$ )
Umidade	%	1,9 ( $\pm 0,2$ )
C (orgânico)	dag kg <sup>-1</sup>	42,16 ( $\pm 2,82$ )
Sólidos voláteis	%	31,2 ( $\pm 0,7$ )
Cinzas	%	51,2 ( $\pm 1,9$ )
Carbono fixo	%	15,6 ( $\pm 1,5$ )
Celulose	%	2,2 <sup>1</sup>
Hemicelulose	%	4,9 <sup>1</sup>
Lignina	%	65,1 <sup>1</sup>
Eq. CaCO <sub>3</sub>		16,73 ( $\pm 2,5$ )
N (total)	g kg <sup>-1</sup>	15,62 ( $\pm 5,19$ )
P	g kg <sup>-1</sup>	17,7 ( $\pm 2,5$ )
K	g kg <sup>-1</sup>	6,1 ( $\pm 0,6$ )
Ca	g kg <sup>-1</sup>	19,3 ( $\pm 2,8$ )
Mg	g kg <sup>-1</sup>	7,3 ( $\pm 1,1$ )
Cu	g kg <sup>-1</sup>	0,17 ( $\pm 0,02$ )
Fe	g kg <sup>-1</sup>	15,3 (2,4)
Mn	g kg <sup>-1</sup>	0,39 ( $\pm 0,03$ )
Mo	g kg <sup>-1</sup>	0,01 ( $\pm 0,001$ )
Zn	g kg <sup>-1</sup>	1,39 ( $\pm 0,22$ )
Na	g kg <sup>-1</sup>	4,09 ( $\pm 0,44$ )
Al	g kg <sup>-1</sup>	26,80 ( $\pm 4,16$ )
Cd	g kg <sup>-1</sup>	0,001 ( $\pm 0,001$ )
Pb	g kg <sup>-1</sup>	0,016 ( $\pm 0,001$ )

Cr	$\text{g kg}^{-1}$	0,040 ( $\pm 0,005$ )
Ni	$\text{g kg}^{-1}$	0,023 ( $\pm 0,002$ )
Ba	$\text{g kg}^{-1}$	0,221 ( $\pm 0,017$ )

Fonte: Autor, 2024

(1) Não houve desvio padrão, pois foram realizados somente duas repetições.  $\pm$ : Desvio padrão

### 3.2 Delineamento experimental e tratamentos

O experimento foi realizado utilizando o delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 3 x 4 mais o tratamento controle com quatro repetições, totalizando 52 unidades experimentais (Figura 2). O tratamento T1 foi constituído pela mistura de lodo de esgoto mais o resíduo de poda não pirolisados (LP), T2 somente por LE e o T3 somente por biocarvão de LE + resíduo de poda (B-LP), constituindo o primeiro fator. O segundo fator de tratamento foi constituído por quatro doses dos materiais (D1, D2, D3 e D4), correspondentes a 5, 10, 20 e 40  $\text{Mg ha}^{-1}$  de biocarvão que estão dentro do limite de 2% (massa/massa) considerado para aplicação de biocarvão como condicionador de solo (NOVOTNY *et al.*, 2015). As doses dos tratamentos LE e mistura (LP) foram calculadas de modo a ofertar as mesmas quantidades de fósforo proporcionadas pelas doses de biocarvão (B-LP), resultando em: 10,4; 20,8; 41,5 e 83,1  $\text{Mg ha}^{-1}$  para o lodo de esgoto e 17,5; 35,1; 70,2 e 140,3  $\text{Mg ha}^{-1}$  para a mistura. O controle foi correspondente à dose zero, ou seja, ausência de resíduos e de biocarvão.

Figura 2 – Distribuição dos vasos na casa de vegetação do departamento de Ciências do Solo da UFC – Campus do Pici



Fonte: Arquivo pessoal, 2024

### 3.3 Instalação e condução do experimento

As doses dos tratamentos avaliados foram convertidas de  $\text{Mg ha}^{-1}$  para  $\text{g vaso}^{-1}$ . Essa conversão levou em consideração a massa de 3kg de solo utilizado para preenchimento de

vasos com capacidade para 2,2 litros, buscando alcançar a densidade de 1,5 kg dm<sup>-3</sup> (Tabela 4). As quantidades da mistura (LP), do lodo de esgoto e do biocarvão foram previamente pesadas no Laboratório de Manejo do Solo e separadas em sacos e potes de plástico. A instalação do experimento foi em 01/09/2023 com a mistura dos tratamentos ao solo dos vasos. A mistura foi efetuada com auxílio de saco plástico (Figura 3) com posterior deposição do material nos vasos, buscando a maior homogeneidade entre as repetições.

Figura 3 - Mistura das doses dos tratamentos nos sacos plásticos para posterior deposição nos vasos.



Fonte: Arquivo pessoal, 2024

Procurou-se deixar cerca de 3 cm até a superfície do vaso sem preenchimento com solo para evitar transbordamento da água de irrigação durante a condução do experimento. Na parte inferior de todos os vasos foi colocada manta de drenagem para evitar perda de solo pelos orifícios do fundo dos vasos. O tratamento controle não teve a adição de lodo de esgoto, biocarvão ou mistura (LP). Após aplicação, a mistura do solo com os tratamentos foi incubada por 18 dias para favorecer a interação dos materiais com o solo utilizado.

Tabela 4 – Quantidade de doses de biomassas utilizadas nos tratamentos

<b>Resíduo</b>	<b>Doses (Mg ha<sup>-1</sup>)</b>			
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
Biocarvão	5,0	10,0	20,0	40,0
Lodo	10,4	20,8	41,5	83,1
Mistura	17,5	35,1	70,2	140,3

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024

Foi realizada a quebra de dormência das sementes de *Mimosa caesalpiniifolia* antes da semeadura nos vasos, seguindo as recomendações do fabricante. As sementes foram colocadas em água quente (entre 80 e 90°C) por cerca de um minuto e, em seguida, imediatamente depositadas em um recipiente com água fria por cerca de 24 horas. Foi realizada a semeadura de 3 sementes por vaso e (Figura 4), 10 dias após a semeadura, foi feito o desbaste das plantas, mantendo apenas uma planta por vaso.

Figura 4 – Vaso com três sementes de *M. caesalpiniifolia*.



Fonte: Arquivo pessoal, 2024

Na irrigação foi utilizada água destilada até atingir 70% da capacidade de campo (Figura 5). A primeira irrigação foi efetuada por ocasião da semeadura, seguida da pesagem dos vasos. A partir disso, os vasos foram pesados diariamente registrando-se a diferença de massa entre sua pesagem inicial e final.

Figura 5 – Irrigação de cada tratamento até atingir 70% da capacidade de campo.



Fonte: Arquivo pessoal, 2024

Para controle de insetos praga foi utilizada cola entomológica aplicada em copos descartáveis (Figura 3) colocados em palitos de madeixa que foram fincados nos vasos. Foi realizada uma aplicação de óleo de neem (*Azadirachta indica*) com emulsificante para o controle da mosca branca (*Bemisia tabaci*) e de pulgão (*Toxoptera citricida*). Durante o

experimento os folíolos que caíram foram coletados e acondicionados em sacos de papel previamente identificados. O experimento foi conduzido por 76 dias após a semeadura.

Figura 6 – Armadilha para insetos pragas



Fonte: Arquivo pessoal, 2024

### 3.4 Avaliações e análises

#### 3.4.1 Desenvolvimento das mudas

O desenvolvimento das plantas foi avaliado pelo número de folhas, altura e diâmetro das plantas medidos a cada 15 dias após a semeadura, totalizando cinco medidas ao longo de 76 dias de condução do experimento, no entanto, apenas a última medição foi considerada nos resultados. Para contagem do número de folhas foi considerado que a *M. caesalpiniifolia* possui folhas compostas pinadas, alternadas, com uma pina de 2 pares de folíolos obovado por folha. A altura das plantas foi medida com auxílio de uma régua graduada em cm. O diâmetro do caule foi mensurado a 2 cm do solo usando paquímetro digital após as plantas terem alcançado resistência que viabilizasse a medida sem rompimento do colo. Desse modo, foram efetuadas três medidas do diâmetro do colo. O incremento em altura foi obtido por meio da diferença entre altura final e inicial.

Figura 7 – Folhas compostas pinadas, alternadas, com uma pina de 2 pares de folíolos

obovado por folha



Fonte: Arquivo pessoal, 2024

Aos 76 dias após a semeadura as plantas foram retiradas dos vasos, separando as raízes da parte aérea (folhas e caule). As raízes mais grossas foram separadas com cuidado, permanecendo no solo as raízes mais finas que foram coletadas ao passar o solo seco em peneira com abertura de malha de 2 mm. Após coleta, tanto as raízes grossas quanto as finas foram lavadas com água comum e água destilada.

Figura 8 – Lavagem das raízes com água destilada



Fonte: Arquivo pessoal, 2024

Após a lavagem e drenagem do excesso de água, foi determinada a massa fresca (MF) de todas as amostras. A MF foi pesada com o uso de balança de precisão. A parte aérea e as raízes foram acondicionadas separadamente em sacos de papel identificados. As amostras

foram secas em estufa de circulação de ar a 65 °C até a massa constante, sendo posteriormente pesadas em balança analítica para quantificação da massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca de raízes (MSR) e massa seca total (MST).

Para a avaliação da qualidade da muda foi realizado o Índice de Qualidade de Dickson (IQD) (2), que considera o equilíbrio da distribuição das fitomassas em seu cálculo, conforme a equação 2 (DICKSON; LEAF; HOSNER, 1960).

$$IQD = \frac{MST\,(g)}{\frac{ALT.\,(cm)}{DIAM.\,(mm)} + \frac{MSPA\,(g)}{MSR\,(g)}}\,(2)$$

### **3.4.2 Análises estatísticas.**

Os dados foram inicialmente analisados quanto à distribuição normal com o uso do teste de Shapiro-Wilk e posteriormente submetidos à análise de variância (ANOVA). Foi realizado teste de Tukey para comparação de médias do fator de tratamento qualitativo ( $p<0,05$ ) e teste de regressão para o fator de tratamento quantitativo ( $p < 0,05$ ). Foi realizado teste de Dunnet para comparação das médias dos tratamentos com o controle. As análises estatísticas foram feitas por meio do software R em sua interface de desenvolvimento interativa (IDI) RStudio (RStudio Team, 2023).

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1 Resumo da Anova para as variáveis analisadas**

A maioria das variáveis avaliadas apresentaram diferenças significativas ( $p<0,001$ ), exceto a altura da planta que não respondeu às doses (Tabela 5). Diante das diferenças significativas nas interações entre resíduos orgânicos e as doses, esses resultados foram destacados como mais importantes.

Tabela 5- Resumo da análise de variância (ANOVA) para número de folhas, altura, diâmetro do caule, matéria seca total e Índice Qualidade de Dickson (IQD) da espécie *M. caesalpiniaeefolia* em função de resíduos orgânicos e doses.

FV	Número de Folhas	Altura da Planta	Diâmetro do Caule	Matéria Seca	IQD
Resíduos orgânicos	<0,0001**	<0,0001**	<0,0001**	<0,0001**	<0,0001**
Doses	<0,0001**	0,0975 <sup>ns</sup>	0,0097**	<0,0001**	0,0011**
Interação	<0,0001**	0,0018**	<0,0001**	<0,0001**	<0,0001**
Controle X Fatores	<0,0001**	0,0024**	0,0002**	<0,0001**	0,0041**
CV (%)	14,15	12,89	9,55	9,79	19,21

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024

FV = Fontes de Variação; \*\*Significativo a 1%; <sup>ns</sup> não significativo; CV = coeficiente de variação.

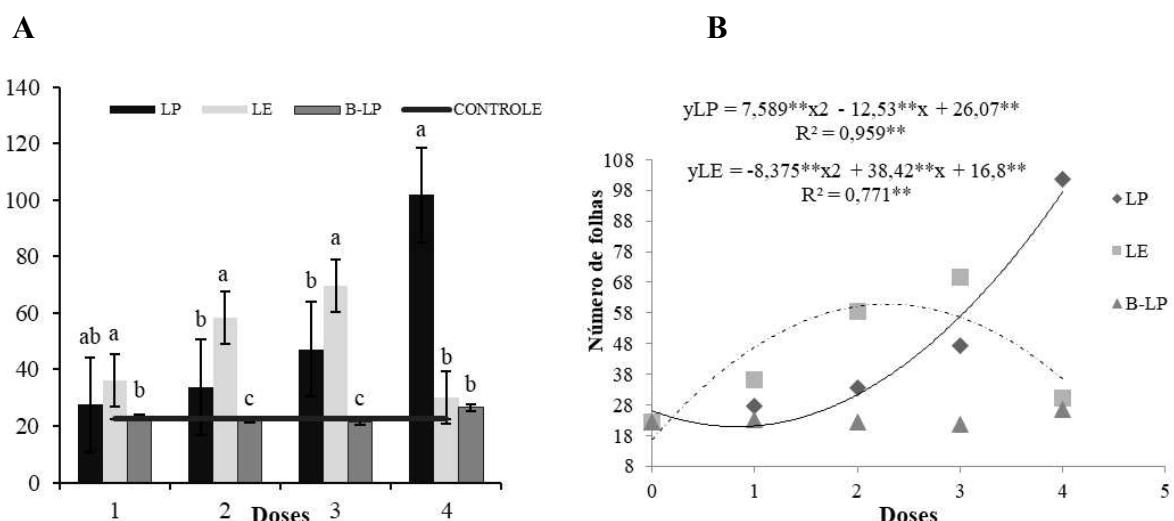
## 4.2 Teste de Tukey e análise de regressão para as variáveis analisadas

### 4.2.1 Número de folhas

Para o número de folhas houve interação entre os resíduos orgânicos e as doses aplicadas. Na dose 1, o LE se destacou como superior ao B-LP, enquanto o tratamento LP não diferiu significativamente em relação aos demais (Figura 4A). Nas doses 2 e 3 observou-se o mesmo padrão, com o LE superior e o B-LP inferior aos outros tratamentos (Figura 4A). O tratamento LP apresentou uma média de número de folhas de 64,12, sendo superior ao B-LP, mas inferior ao LE (Figura 4A). Na dose 4, o tratamento LP resultou em maior média no número de folhas (101,75) em comparação aos outros resíduos, sendo esse o maior número de folhas observado. O B-LP, independentemente da dose aplicada, resultou em valor médio de número de folhas estatisticamente inferior (23,31) aos demais tratamentos (Figura 4A).

A análise de regressão revelou efeito significativo da interação entre as doses aplicadas e os resíduos orgânicos (Figura 4B). Para o B-LP não houve diferenças entre as doses aplicadas. Por outro lado, para os tratamentos LE e LP houve diferença significativa ( $p<0,001$ ). À medida em que as doses aumentaram, o tratamento LP resultou em curva polinomial quadrática positiva, com ponto mínimo (equação  $y_{LP}$ ) na dose 0,83 (14,48 Mg ha<sup>-1</sup> de LP). De modo geral, as curvas para o tratamento LE seguiram comportamento polinomial quadrático negativo, alcançando o número máximo de folhas (equação  $y_{LE}$ ) na dose 2,29 que corresponde a 23,82 Mg ha<sup>-1</sup> de LE.

Figura 9 - Médias do número de folhas de *Mimosa caesalpiniifolia* para o desdobramento da interação entre os materiais orgânicos biocarvão de lodo de esgoto e resíduo de poda de cajueiro (B-LP), lodo de esgoto (LE) e mistura de lodo de esgoto e resíduo de poda de cajueiro (LP) comparadas pelo teste de Tukey (A) a 5% de significância (A) e curvas de regressão em respostas às doses dos materiais aplicados (B).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024

\*Significativo a 5%; \*\*Significativo a 1%; ns Não significativo. Doses: B-LP - D1 a 5, D2 10 D3 20 e D4 40 ( $Mg\ ha^{-1}$ ); LE - D1 10,4; D2 20,8; D3 41,5 e D4 83,1 ( $Mg\ ha^{-1}$ ); LP - D1 17,5; D2 35,1; D3 70,2 e D4 140,3 ( $Mg\ ha^{-1}$ ); CONTROLE: Não houve dose

Esses resultados corroboram com Olher *et al.* (2020) que mostraram que o aumento de doses de lodo de esgoto misturado com outro resíduo resulta em incremento no número de folhas de *Cythereyllum myrianthum*. Eid *et al.* (2020) mostraram que o lodo de esgoto apresenta limite ( $30\ g\ kg^{-1}$ ) para o desenvolvimento do número de folhas de *Corchorus olitorius*, corroborando com os resultados apresentados neste estudo, onde altas doses de LE diminuíram a quantidade de folhas de *M. caesalpiniifolia*.

É importante destacar que, embora o número de folhas seja um parâmetro fortemente influenciado por fatores genéticos, especialmente em espécies nativas que não passaram por melhoramento genético, ele respondeu significativamente aos tratamentos avaliados, mesmo na ausência de melhoramento genético, os resíduos orgânicos podem impactar o desenvolvimento de mudas. A análise dos próximos atributos, como altura, diâmetro do caule, massa seca total e Índice de Qualidade de Dickson (IQD), ajudará a fornecer uma visão mais completa do efeito dos tratamentos.

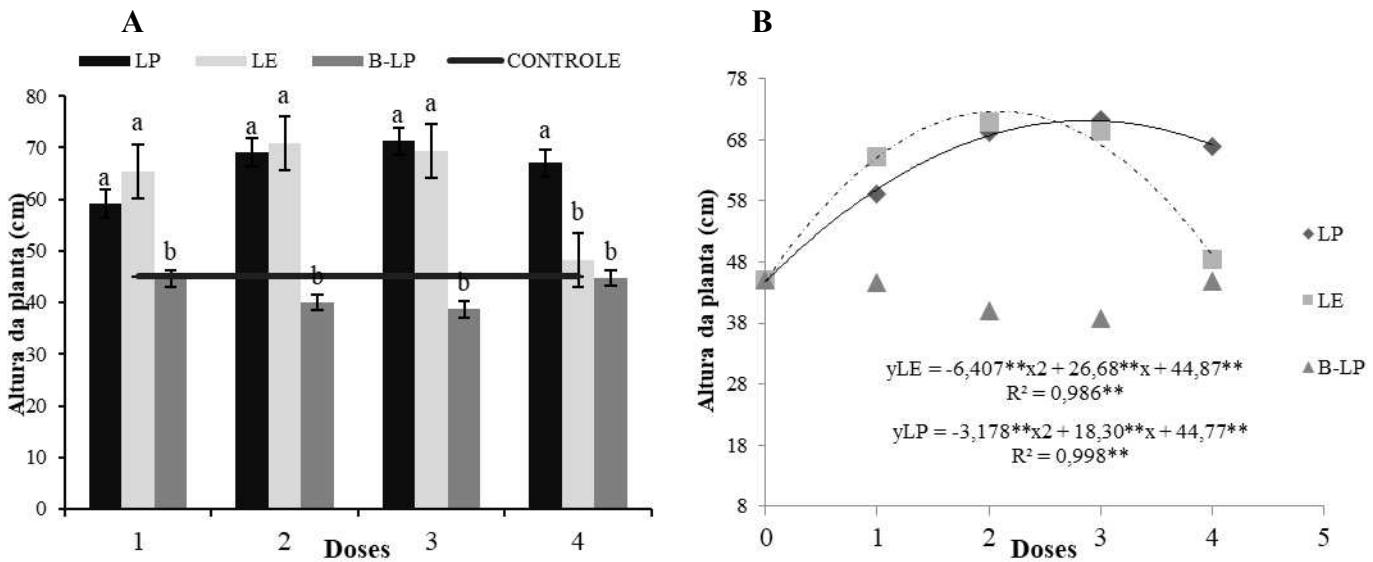
#### **4.2.2 Altura da planta**

Considerando a influência da interação entre os resíduos orgânicos e as doses aplicadas, ao aplicar o teste de Tukey a 5% de significância (Figura 5A), foi observado comportamento semelhante nas doses 1, 2 e 3. Nessas doses, apenas o tratamento B-LP foi inferior (com a média de 42,05cm das quatro doses), enquanto os tratamentos com LP e LE não apresentaram diferenças entre si com os maiores valores (66,63 e 63,48 cm respectivamente). Na dose 4, o tratamento LP se destacou como superior, enquanto os demais tratamentos foram estatisticamente iguais.

Quanto ao comportamento dos resíduos nas doses influenciando a altura das plantas de *M. caesalpiniifolia*. (Figura 5B), foi constatada diferença significativa nos tratamentos LE e LP a 1% de significância. Os dados da variável com tratamento B-LP não apresentaram ajuste para nenhum dos modelos de regressão testados. Entretanto, os tratamentos LE (equação  $y_{LE}$ ) e LP (equação  $y_{LP}$ ) resultaram em curvas polinomiais quadráticas negativas, com os pontos máximos de altura das plantas ocorrendo nas doses 2,08 e 2,88 que correspondem a  $21,62\ Mg\ ha^{-1}$  de LE e  $50,51\ Mg\ ha^{-1}$  de LP, respectivamente.

Figura 10 - Médias da altura da planta (cm) de *Mimosa caesalpiniifolia* para o desdobramento da interação entre os materiais orgânicos biocarvão de lodo de esgoto e resíduo de poda de cajueiro (B-LP), lodo de esgoto (LE) e mistura de lodo de esgoto e resíduo de poda de cajueiro (LP) comparadas pelo teste de Tukey (A) a 5% de significância (A) e curvas de regressão em

respostas às doses dos materiais aplicados (B).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024

\*Significativo a 5%; \*\*Significativo a 1%; ns Não significativo. Doses: B-LP - D1 a 5, D2 10 D3 20 e D4 40 ( $Mg\ ha^{-1}$ ); LE - D1 10,4; D2 20,8; D3 41,5 e D4 83,1 ( $Mg\ ha^{-1}$ ); LP - D1 17,5; D2 35,1; D3 70,2 e D4 140,3 ( $Mg\ ha^{-1}$ ); CONTROLE: Não houve dose

Esses resultados estão alinhados com o estudo de Martins *et al.* (2018), que demonstrou aumento na altura de *Zea mays l.* quando o LE foi incorporado com outro resíduo orgânico. Gonzaga *et al.* (2018) também obtiveram resultados semelhantes em mudas de *Eucalyptus grandis*, observando que as médias das diferentes doses de biocarvão de lodo de esgoto não apresentaram diferenças significativas. Além disso, Eid *et al.* (2020) encontraram que, com o aumento das doses de LE, as plantas de *Crochus olitorius* atingiram limite de altura na dose de  $20\ g\ kg^{-1}$ , seguido por diminuição na altura das plantas a partir da dose  $30\ g\ kg^{-1}$ .

Os resultados obtidos para a altura das plantas de *M. caesalpiniaefolia* parecem coerentes com os dados de número de folhas, uma vez que os tratamentos com LP e LE mostraram os maiores valores em ambos os parâmetros nas doses 2 e 3, sugerindo que essas doses são mais eficientes para o desenvolvimento da planta. No entanto, é importante destacar que um crescimento exagerado em altura, como observado em algumas doses, pode indicar estiolamento. O estiolamento, embora aumente a altura, pode ser prejudicial para o desenvolvimento geral da planta, já que resulta em caules mais finos e fracos. Portanto, é essencial encontrar um equilíbrio entre o crescimento em altura e o diâmetro do caule, uma vez que caules robustos são necessários para a sustentação da planta, o que direciona a análise para a avaliação do próximo atributo de qualidade das mudas.

#### 4.2.3 Diâmetro do Caule

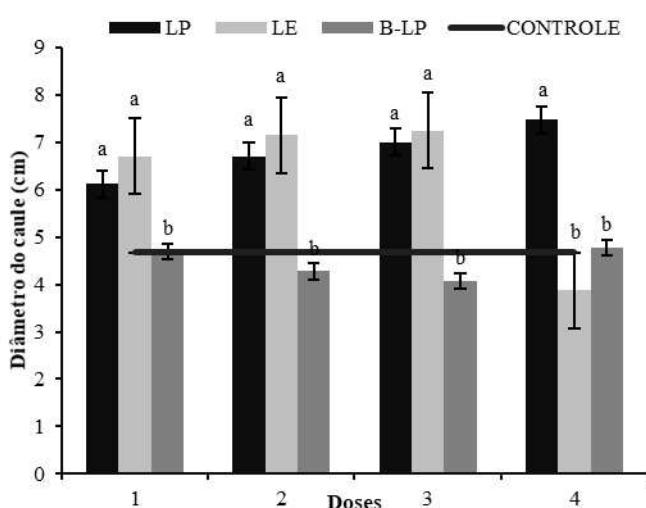
Para o efeito da interação entre os resíduos e as doses aplicadas, o tratamento B-LP

apresentou, independente da dose, a menor média (4,46 mm) em comparação aos demais resíduos avaliados cujas médias de diâmetro do colmo variaram de 6,7 a 7,47 mm (Figura 6A). Além disso, os tratamentos LE e LP apresentaram resultados estatisticamente iguais para todas as doses (de 6,7 a 7,25 e de 6,12 a 7,47mm, respectivamente), exceto para a dose 4 de LE (3,87 mm).

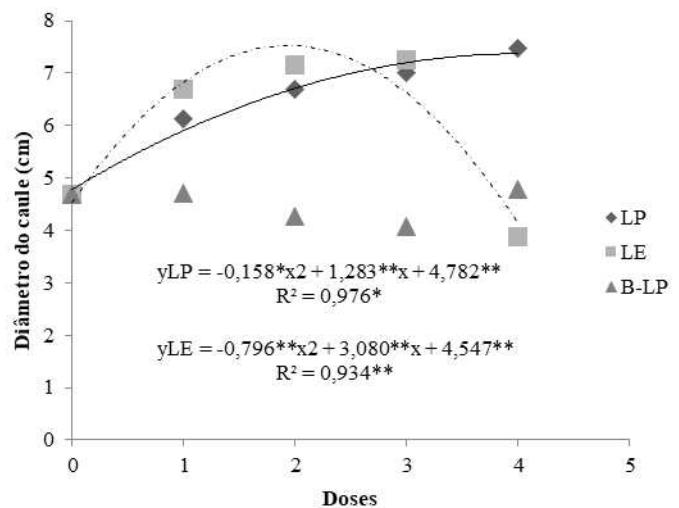
Nos tratamentos LP e LE, houve tendências significativas de crescimento no diâmetro do caule, enquanto o tratamento B-LP não apresentou ajuste para nenhum dos modelos analisados (Figura 6B). Os tratamentos LP (equação yLP) e LE (equação yLE) se ajustaram ao modelo polinomial quadrático negativo.

Figura 11 - Médias do diâmetro do caule (mm) de *Mimosa caesalpiniifolia* para o desdobramento da interação entre os materiais orgânicos biocarvão de lodo de esgoto e resíduo de poda de cajueiro (B-LP), lodo de esgoto (LE) e mistura de lodo de esgoto e resíduo de poda de cajueiro (LP) comparadas pelo teste de Tukey (A) a 5% de significância (A) e curvas de regressão em respostas às doses dos materiais aplicados (B).

A



B



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024

\*Significativo a 5%; \*\*Significativo a 1%; ns Não significativo. Doses: B-LP - D1 a 5 D2 10 D3 20 e D4 40 ( $Mg ha^{-1}$ ); LE - D1 10,4; D2 20,8; D3 41,5 e D4 83,1 ( $Mg ha^{-1}$ ); LP - D1 17,5; D2 35,1; D3 70,2 e D4 140,3 ( $Mg ha^{-1}$ ); CONTROLE: Não houve dose

Siqueira *et al.* (2019) encontraram resultados semelhantes para o diâmetro do colmo com o uso de LE e misturas de LE com substrato de casca de pinus e fibra de coco em *Plathymenia reticulata Benth.* Segundo os autores, doses mais altas nas proporções de LE foram prejudiciais ao crescimento do colmo da planta. Entretanto, a mistura de LE com substrato de casca de pinus e a mistura de LE com substrato de fibra de coco foram benéficas para o crescimento de *P. reticulata*.

Os resultados obtidos para o diâmetro do caule reforçam a importância de se manter um equilíbrio entre crescimento em altura e diâmetro, além da produção de biomassa, para

avaliar de forma mais completa o desenvolvimento das plantas perenes. O fato de o tratamento B-LP ter apresentado o menor valor médio de diâmetro, independente da dose, aliado ao fato de LP e LE mostrarem resultados superiores, sugere que o B-LP pode não estar fornecendo os nutrientes de forma eficiente para promover um crescimento mais robusto.

Um diâmetro adequado é crucial para evitar que o crescimento em altura, como observado anteriormente, seja apenas reflexo de um estiolamento, especialmente em condições de luminosidade inadequada ou em competição por luz. Assim, o desenvolvimento equilibrado entre altura e diâmetro é fundamental para garantir plantas com maior resistência mecânica e maior capacidade de sustentar a biomassa. Este equilíbrio é ainda mais relevante quando se considera o próximo aspecto a ser avaliado: a massa seca e o Índice de Qualidade de Dickson, que fornecem uma visão mais ampla sobre a qualidade geral das mudas e seu potencial para sobreviver e prosperar no campo.

#### **4.2.4 Matéria Seca Total**

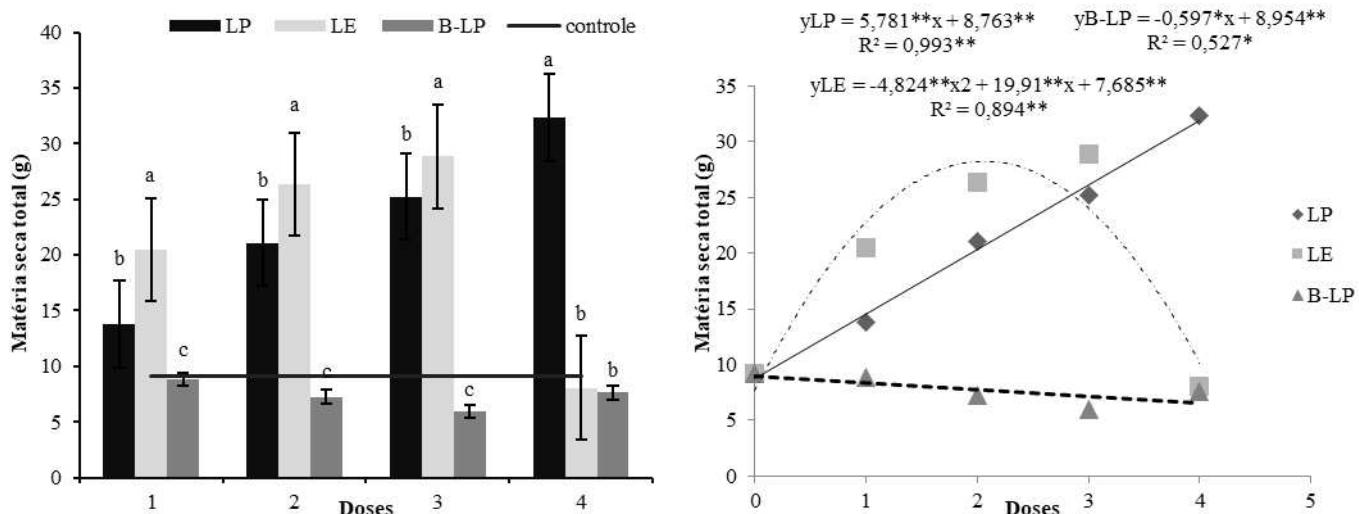
O B-LP resultou, de modo geral, em valor inferior de massa seca total de plantas de *M. caesalpiniifolia* (7,40 g) em relação a LP e LE, cujas médias de massa seca total foram 23,11 e 20,92 g, respectivamente (Figura 7A). Nas doses 1, 2 e 3 o LE resultou em médias de massa seca total superiores aos demais tratamentos, com valores de 20,44, 26,35 e 28,84 g, respectivamente. Porém, na dose 4 o LP se destaca, resultando em maior biomassa seca total (32,34 g) em relação ao LE e B-LP (8,06 e 7,62 g, respectivamente).

Na análise de regressão se constata que todos os resíduos orgânicos se ajustaram a modelos matemáticos (Figura 7B). A curva para o tratamento LP foi linear quadrática positiva (equação  $y_{LP}$ ). O tratamento LE resultou em curva polinomial quadrática negativa (equação  $y_{LE}$ ). Já a curva para o tratamento B-LP inicialmente apresentou comportamento linear quadrática negativa até a dose 3 do biocarvão (equação  $y_{B-LP}$ ).

Figura 12 - Médias matéria seca total (g) de *Mimosa caesalpiniifolia* para o desdobramento da interação entre os materiais orgânicos biocarvão de lodo de esgoto e resíduo de poda de cajueiro (B-LP), lodo de esgoto (LE) e mistura de lodo de esgoto e resíduo de poda de cajueiro (LP) comparadas pelo teste de Tukey (A) a 5% de significância (A) e curvas de regressão em respostas às doses dos materiais aplicados (B).

**A**

**B**



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024

\*Significativo a 5%; \*\*Significativo a 1%; ns Não significativo. Doses: B-LP - D1 a 5, D2 10 D3 20 e D4 40 ( $Mg\ ha^{-1}$ ); LE - D1 10,4; D2 20,8; D3 41,5 e D4 83,1 ( $Mg\ ha^{-1}$ ); LP - D1 17,5; D2 35,1; D3 70,2 e D4 140,3 ( $Mg\ ha^{-1}$ ); CONTROLE: Não houve dose

Os resultados aqui apresentados não diferem do encontrado por Lacerda *et al.* (2022)

que utilizaram lodo de esgoto como substrato na produção de mudas de *Leucanthemum maximum* e *Gypsophila elegans*. No estudo citado o LE aumentou a massa seca total das plantas nos tratamentos em doses de 5 e 8  $Mg\ ha^{-1}$ . A alta presença de elementos potencialmente tóxicos como Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Pb e As (EID *et al.*, 2021; MOREIRA, Rodrigo Santos *et al.*, 2020; NYASHANU; SHAFODINO; MWAPAGHA, 2023) em doses maiores de LE pode ter influenciado no desenvolvimento do colmo da planta de *M. caesalpiniifolia*.

Os resultados de LP diferem dos resultados achados na pesquisa de Olher *et al.* (2020) em que o lodo de esgoto incorporado com outro resíduo orgânico não promoveu diferenças na matéria seca total das mudas de *Cytharexylum myrianthum* ao final de 180 dias após o transplantio, o estudo em questão apresentava uma baixa quantidade de nutrientes N, P e K no lodo de esgoto que pode ter influenciado na matéria seca de *C. myrianthum*.

Apesar dos parâmetros analisados até o momento fornecerem importantes informações sobre o desenvolvimento das mudas, eles podem não ser suficientes para indicar o melhor desempenho de crescimento. Nesse sentido, é pertinente considerar as respostas obtidas a partir do Índice de Qualidade de Dickson, que leva em consideração o equilíbrio entre diferentes partes da planta e o seu desenvolvimento.

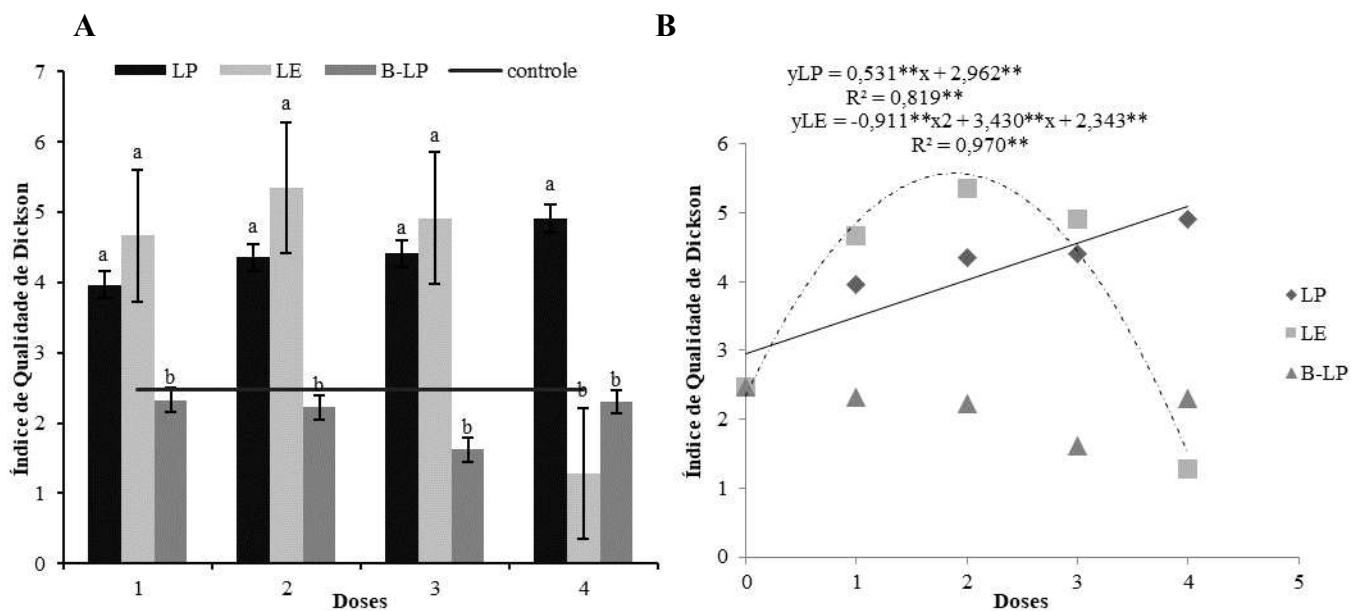
#### 4.2.5 Índice de Qualidade de Dickson (IQD)

O B-LP apresentou valor inferior (2,11) do índice de qualidade de Dickson em relação ao LP e LE em todas as doses (4,41 e 4,05, respectivamente). Nas doses 1, 2 e 3, o LE resultou em médias superiores (4,66, 5,35 e 4,91, respectivamente) em comparação com os outros tratamentos. No entanto, na dose 4, o LP se destacou, apresentando valor superior (4,91) em

relação ao do LE e B-LP (1,28 e 2,29, respectivamente) (Figura 8A).

A análise de regressão para o IQD mostrou tendências significativas nos tratamentos com LP e LE a 1% de significância (Figura 8B). Para o tratamento B-LP não houve ajuste para nenhum dos modelos de regressão analisados (Figura 8B). A curva para o tratamento LP foi linear quadrática positiva (equação  $y_{LP}$ ), e o tratamento LE resultou em equação polinomial quadrática negativa (equação  $y_{LE}$ ).

Figura 13 - Médias do Indice de Qualidade de Dickson de *Mimosa caesalpiniifolia* para o desdobramento da interação entre os materiais orgânicos biocarvão de lodo de esgoto e resíduo de poda de cajueiro (B-LP), lodo de esgoto (LE) e mistura de lodo de esgoto e resíduo de poda de cajueiro (LP) comparadas pelo teste de Tukey (A) a 5% de significância (A) e curvas de regressão em respostas às doses dos materiais aplicados (B).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024

\*Significativo a 5%; \*\*Significativo a 1%; ns Não significativo. Doses: B-LP - D1 a 5, D2 10 D3 20 e D4 40 ( $Mg\ ha^{-1}$ ); LE - D1 10,4; D2 20,8; D3 41,5 e D4 83,1 ( $Mg\ ha^{-1}$ ); LP - D1 17,5; D2 35,1; D3 70,2 e D4 140,3 ( $Mg\ ha^{-1}$ ); CONTROLE: Não houve dose

O IQD neste estudo não foi favorecido pelas doses de biocarvão, diferindo do observado por Gonzaga *et al.* (2018) em que doses menores de 20 até  $t\ ha^{-1}$  de biocarvão de LE apresentaram efeitos positivos em mudas de *Eucalyptus grandis* diferindo das doses maiores do mesmo resíduo. É importante notar que o estudo de Gonzaga *et al.*, (2018) também utilizaram aditivos de NPK 14-14-14, o que pode ter influenciado os resultados. O *E. grandis*, por não ser uma leguminosa, possui diferentes demandas nutricionais comparado a *M. caesalpiniifolia*, uma leguminosa que pode ter necessidades específicas de nutrientes e maior sensibilidade a resíduos.

Ao ponderar sobre os resultados obtidos, há uma consistência quando se compara a qualidade das mudas com os parâmetros de número de folhas, altura, diâmetro e massa seca.

Embora o LP tenha se destacado na dose 4 em todos os parâmetros e LE se destacou nas três primeiras doses, o B-LP não apresentou resultados favoráveis na maioria dos parâmetros analisados.

Para uma avaliação mais completa, é fundamental analisar o efeito dos resíduos em relação à ausência dos mesmos. O teste de Dunnett será utilizado para essa comparação, permitindo identificar diferenças estatísticas significativas entre os tratamentos e o controle. Esta análise é crucial para determinar o impacto real dos resíduos no desenvolvimento das mudas.

#### **4.3 Teste de Dunnet para as variáveis analisadas**

Aplicou-se o teste de Dunnett para avaliar a interação entre os resíduos orgânicos e as doses em comparação com o controle (Tabela 6). Não houve diferença significativa entre B-LP e o controle, independentemente do tratamento ou da dose aplicada. Nos tratamentos LE e LP, houve aumento no número de folhas, com o LE superando o controle nas doses 1, 2 e 3 com 13, 36 e 47 folhas a mais, enquanto o LP foi superior nas doses 3 e 4 com 25 e 79 folhas a mais que o controle.

Os tratamentos LE e LP aumentaram significativamente a altura das plantas de *M. Caesalpiniifolia* em relação ao controle (Tabela 6). O tratamento LE resultou em médias superiores ao controle nas doses 1, 2 e 3, com valores de 65,32, 70,9 e 69,37 cm, respectivamente. Já o tratamento com LP foi superior nas doses 2, 3 e 4 (69,12, 71,25 e 67 cm, respectivamente).

Em relação ao diâmetro do caule, matéria seca total da planta (parte aérea e raiz) e o Índice de Qualidade de Dickson (IQD), as respostas foram semelhantes: o tratamento LE apresentou médias superiores ao controle nas doses 1, 2 e 3 (4,66, 5,35, 4,91 respectivamente), enquanto o tratamento com LP foi superior ao controle em todas as doses.

Tabela 6 - Teste de Dunnett para o desdobramento das médias da interação dos resíduos orgânicos e doses para as variáveis número de folhas (adimensional), altura da planta (cm), diâmetro do caule (mm), matéria seca total (g) e índice de qualidade de dickson (IQD adimensional) da *M. caesalpiniaefolia* em resposta ao biocarvão de lodo de esgoto e resíduo de poda de cajueiro (B-LP), lodo de esgoto (LE) e mistura de lodo de esgoto com resíduo de poda de cajueiro (LP) comparados ao tratamento controle.

Resíduos	Doses aplicadas ( $Mg\ ha^{-1}$ )			
	1	2	3	4
<b>NÚMERO DE FOLHAS</b>				
B-LP	23,00 <sup>ns</sup>	22,25 <sup>ns</sup>	21,50 <sup>ns</sup>	26,50 <sup>ns</sup>
LE	36,00*	58,50*	69,75*	30,25 <sup>ns</sup>
LP	27,50 <sup>ns</sup>	33,75 <sup>ns</sup>	47,25*	101,75*
Controle	22,50			

<b>ALTURA DA PLANTA (cm)</b>				
B-LP	44,66 <sup>ns</sup>	40,08 <sup>ns</sup>	38,70 <sup>ns</sup>	44,80 <sup>ns</sup>
LE	65,33*	71,00*	69,38*	48,33 <sup>ns</sup>
LP	59,15 <sup>ns</sup>	69,13*	71,26*	67,00*
Controle	45,08			
<b>DIÂMETRO DO CAULE (cm)</b>				
B-LP	4,70 <sup>ns</sup>	4,28 <sup>ns</sup>	4,08 <sup>ns</sup>	4,78 <sup>ns</sup>
LE	6,70*	7,15*	7,25*	3,80 <sup>ns</sup>
LP	6,13*	6,70*	7,00*	7,48*
Controle	4,68			
<b>MATÉRIA SECA TOTAL (g)</b>				
B-LP	8,83 <sup>ns</sup>	7,24 <sup>ns</sup>	5,92 <sup>ns</sup>	7,63 <sup>ns</sup>
LE	20,45*	26,35*	28,85*	8,06 <sup>ns</sup>
LP	13,78*	21,09*	25,23*	32,35*
Controle	9,16			
<b>IQD</b>				
B-LP	2,32 <sup>ns</sup>	2,22 <sup>ns</sup>	1,61 <sup>ns</sup>	2,30 <sup>ns</sup>
LE	4,66*	5,35*	4,91*	1,29 <sup>ns</sup>
LP	3,97*	4,35*	4,41*	4,91*
Controle	2,47749			

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024

\*Significativo a 5%; \*\*Significativo a 1%; <sup>ns</sup> Não significativo. Doses: B-LP - D1 a 5, D2 10 D3 20 e D4 40 ( $Mg\ ha^{-1}$ ); LE - D1 10,4; D2 20,8; D3 41,5 e D4 83,1 ( $Mg\ ha^{-1}$ ); LP - D1 17,5; D2 35,1; D3 70,2 e D4 140,3 ( $Mg\ ha^{-1}$ )

Ao contrastar os efeitos dos resíduos orgânicos sobre o crescimento das plantas, observou-se que o tratamento com biocarvão levou a resultados diferentes do esperado quando comparado aos outros tratamentos. As características do biocarvão aprimoram as propriedades químicas e físicas do solo, uma vez que a disponibilidade de água e ar assim como a profundidade de infiltração na zona radicular, são determinadas principalmente pela composição física das camadas do solo, auxiliando no crescimento da raiz da planta (LEHMANN *et al.*, 2011; QAMBRANI *et al.*, 2017), mas isso não influenciou diretamente o crescimento das plantas de *M. caesalpiniifolia*.

Uma possível explicação para os resultados insatisfatórios do B-LP é a alta recalcitrância do biocarvão que dificulta a liberação de nutrientes para as plantas, que ocorre de forma lenta e gradual (FORJÁN *et al.*, 2018). Diante disso, seria necessário um período mais prolongado de estudos para avaliar o crescimento da *M. caesalpiniifolia* com o uso do biocarvão.

Por ser rico em nitrogênio, com elevados teores de matéria orgânica e micronutrientes (BETTIOL; CAMARGO, 2006) o LE e LP apresentaram resultados positivos para o desenvolvimento da planta, visto que o teor de nitrogênio do LE ( $38,84\ g\ kg^{-1}$ ) foi maior que o biocarvão ( $15,62\ g\ kg^{-1}$ ), o que pode ter influenciado para um maior desenvolvimento da planta em D1 e D2. Porém, doses maiores com alto teor de metais pesados pode ter sido nocivos ao sabiá, prejudicando o seu desenvolvimento aéreo e radicular.

## 5 CONCLUSÃO

O biocarvão produzido a partir da copirólise de lodo de esgoto e resíduo de poda de cajueiro não apresentou efeitos significativos no desenvolvimento inicial da *M. caesalpiniaefolia* para a maioria dos parâmetros analisados, exceto na análise de regressão para a matéria seca. Um período de estudos maior no uso de biocarvão poderiam potencialmente resultar em efeitos mais positivos.

Doses de até 70,2 Mg ha<sup>-1</sup> de lodo de esgoto apresentaram resultados positivos para o desenvolvimento das mudas de *M. caesalpiniifolia*. No entanto, a partir de 83,1 Mg ha<sup>-1</sup> de lodo de esgoto causam um efeito tóxico. O aumento das doses da mistura de lodo de esgoto com resíduo de poda foi favorável para o desenvolvimento de mudas de *M. caesalpiniifolia*.

## REFERÊNCIAS

- ABEL, Stefan; PETERS, Andre; TRINKS, Steffen; SCHONSKY, Horst; FACKLAM, Michael; WESSOLEK, Gerd. Impact of biochar and hydrochar addition on water retention and water repellency of sandy soil. **Geoderma**, vol. 202–203, p. 183–191, jul. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.03.003>.
- AGEGNEHU, Getachew; SRIVASTAVA, A.K.; BIRD, Michael I. The role of biochar and biochar-compost in improving soil quality and crop performance: A review. **Applied Soil Ecology**, vol. 119, p. 156–170, out. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.06.008>.
- ANDRADE, João Carlos de; ABREU, Mônica Ferreira de. **Análise Química de Resíduos Sólidos para Monitoramento e Estudos Agroambientais**. 1º ed. Campinas: IAC, 2006. vol. 1, .
- ANTÔNIO GIVANILSON RODRIGUES DA SILVA. **BIOCARVÃO DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR COMO CONDICIONADOR DE SOLOS: PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO**. Fortaleza: [s. n.], 2022. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/70972>. Acessado em: 28 jan. 2024.
- ARAÚJO FILHO, J. **Manejo pastoril sustentável da caatinga**. IICA, Brasília (Brasil) Projeto Dom Helder Câmara, Recife (Brasil) Projeto SEMEAR, Brasília (Brasil) Associação Brasileira de Agroecologia, Rio Grande do Sul (Brasil), 2013.
- ASTM. Standard test method for chemical analysis of wood charcoal. ASTM D1762 - 84. **American S ed.**, West Conshohocken, vol. 4.10, p. 2, 2013. .
- BARBOSA, Tiago da Costa Silva; DE OLIVEIRA, Vládia Pinto Vidal. Áreas suscetíveis à desertificação no Ceará: aspectos ambientais dos municípios de Tauá - CE e Irauçuba - CE / Susceptible areas to desertification in Ceará: environmental aspects of the municipalities of Tauá - CE and Irauçuba - CE. **Brazilian Journal of Development**, vol. 8, nº 7, p. 52330–52349, 20 jul. 2022. <https://doi.org/10.34117/bjdv8n7-243>.
- BETTIOL, Wagner; CAMARGO, Otávio (Orgs.). **Lodo de esgoto: impactos ambientais na**

**agricultura.** 1º ed. Jaguariúna: Embrapa meio ambiente, 2006. vol. 1, .

BITTENCOURT, Simone; AISSE, Miguel Mansur; SERRAT, Beatriz Monte. Gestão do uso agrícola do lodo de esgoto: estudo de caso do estado do Paraná, Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, vol. 22, nº 6, p. 1129–1139, dez. 2017. <https://doi.org/10.1590/s1413-41522017156260>.

BRASIL NETO, Reginaldo Moura; SANTOS, Celso Augusto Guimarães; SILVA, Jorge Flávio Casé Braga da Costa; DA SILVA, Richarde Marques; DOS SANTOS, Carlos Antonio Costa; MISHRA, Manoranjan. Evaluation of the TRMM product for monitoring drought over Paraíba State, northeastern Brazil: a trend analysis. **Scientific Reports**, vol. 11, nº 1, p. 1097, 13 jan. 2021. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-80026-5>.

BRASIL. SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO (SNIS).  
**Diagnóstico Temático Serviços de Água e Esgoto. Brasília: Ministério do Desenvolvimento Regional.** Secretaria Nacional de Saneamento (Sns), 2021. Disponível em:  
[https://www.gov.br/cidades/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snис/produtos-do-snис/diagnosticos/DIAGNOSTICO\\_TEMATICO\\_VISAO\\_GERAL\\_AE\\_SNIS\\_2021.pdf](https://www.gov.br/cidades/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snис/produtos-do-snис/diagnosticos/DIAGNOSTICO_TEMATICO_VISAO_GERAL_AE_SNIS_2021.pdf)  
acesso em: 14/03/2024

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Resolução nº 498/2020, 19 de agosto de 2020. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 21 de agosto de 2020. Seção 1, p. 265 – 269.

BRASIL. Lei nº 12305, de 02 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.** Diário Oficial da União, Brasília, DF, 03 de agosto 2010. Seção 1, p.13. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm). Acesso em: 19/06/2024

CARVALHO, P. E. R. Sabiá-*Mimosa caesalpiniifolia*. Embrapa Florestas-Circular Técnica (INFOTECA-E), 2007.

PAREYN, Frans Germain Corneel; Araújo, Elcida de Lima; DRUMOND, Marcos Antônio. Mimosa caesalpiniifolia: sabiá. In: CORADIN, Lídio; CAMILLO, Julcélia; PAREYN, Frans Germain Corneel (org.). **Espécies Nativas da Flora Brasileira de Valor Econômico Atual ou Potencial: plantas para o futuro: região nordeste.** Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2018. p. 759-765. Disponível em:<<http://www.mma.gov.br/publicacoes/biodiversidade/category/142-serie-biodiversidade.html>>, Acesso em: 01/10/2023

CHEW, Kit Wayne; CHIA, Shir Reen; CHIA, Wen Yi; CHEAH, Wai Yan; MUNAWAROH, Heli Siti Halimatul; ONG, Wee-Jun. Abatement of hazardous materials and biomass waste via pyrolysis and co-pyrolysis for environmental sustainability and circular economy. **Environmental Pollution**, vol. 278, p. 116836, jun. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116836>.

CHIOMENTO, J.L.T.; DE NARDI, F.S.; TRENTIN, T.S.; BASÍLIO, L.S.P.; LIMA, Giuseppina Pace Pereira; CALVETE, E.O. FUNGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES E BIOCARVÃO COMO FERRAMENTAS SUSTENTÁVEIS NO CULTIVO DO MORANGUEIRO: UMA REVISÃO NARRATIVA. **SUSTENTÁVEIS NO CULTIVO DO MORANGUEIRO: UMA REVISÃO NARRATIVA. Open Science Research VI.** [S. l.]: Editora Científica Digital, 2022. p. 67–84. <https://doi.org/10.37885/220910247>.

COCIONE, Aline Renée; RAIJ, Bernardo van; ABREU, Cleide Aparecida de; GHEYI, Hans Raji; CANTARELLA, Heitor; ANDRADE, João Carlos de; QUAGGIO, José Antônio; PROCHNOW, Luiz Ignácio; FERREIRA, Manoel Evaristo; ABREU, Mônica Ferreira de; BAAGLIA, Ondino Cleante; TRIVELIN, Paulo Cesar Ocheuze. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais.** 1º ed. Campinas: Instituto Agronômico Campinas, 2001. vol. 1, .

CORREIA, Maria Elizabeth Fernandes; MOREIRA, Joventino Fernandes; REIS, Luciano Lopes; CAMILO, Fernanda De Lima; RODRIGUES, Khalil De Menezes; CAMPELLO, Eduardo Francia Carneiro; DE FARIA, Sergio Miana; CHAER, Guilherme Montandon; RESENDE, Alexander Silva de. Fauna edáfica no processo de revegetação de áreas de mineração de bauxita em Porto Trombetas, Pará. **Ciência Florestal**, vol. 30, nº 4, p. 1048–1060, 1 dez. 2020. <https://doi.org/10.5902/1980509839276>.

DICKSON, Alexander; LEAF, Albert L.; HOSNER, John F. QUALITY APPRAISAL OF WHITE SPRUCE AND WHITE PINE SEEDLING STOCK IN NURSERIES. **The Forestry Chronicle**, vol. 36, nº 1, p. 10–13, 1 mar. 1960. <https://doi.org/10.5558/tfc36010-1>.

DOMINATI, E.; MACKAY, A.; GREEN, S.; PATTERSON, M. A soil change-based methodology for the quantification and valuation of ecosystem services from agro-ecosystems: A case study of pastoral agriculture in New Zealand. **Ecological Economics**, vol. 100, p. 119–129, abr. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2014.02.008>.

EDNEIDA RABELO CAVALCANTI; ELENA MARÍA ABRAHAM; FRANCISLENE ANGELOTTI; JÉMISON MATTOS DOS SANTOS; JOSÉ MARIA MARQUES DE CARVALHO; JOSÉ NARCISO SOBRINHO; JOSEMAR DA SILVA MARTINS; MÁRCIO DOS SANTOS PEDREIRA; MARIO ALBERTO SALOMÓN SIROLESI; ODO PRIMAVESI; PAULO NOBRE; SILVIO JOSÉ ROSSI; VANDERLISE GIONGO. **Desertificação e mudanças climáticas no semiárido brasileiro**. Campina Grande: Instituto Nacional do Semiárido, 2011.

EID, Ebrahem M.; HUSSAIN, Ahmed A.; TAHER, Mostafa A.; GALAL, Tarek M.; SHALTOUT, Kamal H.; SEWELAM, Nasser. Sewage Sludge Application Enhances the Growth of *Cochrorus olitorius* Plants and Provides a Sustainable Practice for Nutrient Recirculation in Agricultural Soils. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, vol. 20, nº 1, p. 149–159, 22 mar. 2020. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-00113-z>.

EID, Ebrahem M.; SHALTOUT, Kamal H.; ALAMRI, Saad A.M.; ALRUMMAN, Sulaiman A.; HUSSAIN, Ahmed A.; SEWELAM, Nasser; EL-BEBANY, Ahmed F.; ALFARHAN, Ahmed H.; PICÓ, Yolanda; BARCELO, Damia. Prediction models based on soil properties for evaluating the uptake of eight heavy metals by tomato plant (*Lycopersicon esculentum* Mill.) grown in agricultural soils amended with sewage sludge. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, vol. 9, nº 5, p. 105977, out. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105977>.

ENDERS, Akio; LEHMANN, Johannes. Comparison of Wet-Digestion and Dry-Ashing Methods for Total Elemental Analysis of Biochar. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, vol. 43, nº 7, p. 1042–1052, abr. 2012.

[https://doi.org/10.1080/00103624.2012.656167.](https://doi.org/10.1080/00103624.2012.656167)

Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (Brasil). **Dia Mundial de Combate à Desertificação: ações e conscientização humana para um futuro sustentável.** Ceará: FUNCEME, (2018). Disponível em: <http://www.funceme.br/?p=1739#:~:text=De%20acordo%20com%20o%20último,de%20Irauçuba%20e%20seus%20circunvizinhos>. Acesso em: 22/08/2023

FACUNDO, André Leone; MATSUNO DA FROTA, André Francisco. **O PROCESSO DE DESERTIFICAÇÃO NO NÚCLEO DE IRAUÇUBA, CEARÁ: FATORES AMBIENTAIS, USO E OCUPAÇÃO DO SOLO.** [S. l.: s. n.], 2020. Disponível em: file:///C:/Users/RENAN/Documents/TCC/lhilgemberg,+6+-+O+PROCESSO+DE+DESERTIFICAÇÃO.pdf. Acessado em: 21 jan. 2024.

FAN, Jianping; LI, Yan; YU, Huayong; LI, Yuxuan; YUAN, Qiangjun; XIAO, Honglin; LI, Fangfang; PAN, Bo. Using sewage sludge with high ash content for biochar production and Cu(II) sorption. **Science of The Total Environment**, vol. 713, p. 136663, abr. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136663>.

FARIAS, W. M. **Biocarvão De Lodo De Esgoto Como Condicionador Do Solo: Efeitos Nas Propriedades Agronômicas, Fertilidade Do Solo E Qualidade Da Matéria Orgânica.** 2018. 121p. Tese (Doutorado em Agronomia). Universidade de Brasília, Brasília.

FAO. Solos saudáveis para as pessoas e para o planeta: FAO pede reversão da degradação do solo. 28 jan. 2022. Disponível em: <https://www.fao.org/brasil/noticias/detail-events/fr/c/1472352/>. Acessado em: 16 maio 2024.

FEI, Ying-heng; ZHAO, Dan; LIU, Ye; ZHANG, Weihua; TANG, Yuan-yuan; HUANG, Xuexia; WU, Qihang; WANG, Yue-xing; XIAO, Tangfu; LIU, Chengshuai. Feasibility of sewage sludge derived hydrochars for agricultural application: Nutrients (N, P, K) and potentially toxic elements (Zn, Cu, Pb, Ni, Cd). **Chemosphere**, vol. 236, p. 124841, dez. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124841>.

FIGUEIREDO, Cícero Célio de; CHAGAS, Jhon Kenedy Moura; DA SILVA, Juscimar; PAZ-

FERREIRO, Jorge. Short-term effects of a sewage sludge biochar amendment on total and available heavy metal content of a tropical soil. **Geoderma**, vol. 344, p. 31–39, jun. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.01.052>.

FORJÁN, Rubén; RODRÍGUEZ-VILA, Alfonso; PEDROL, Nuria; COVELO, Emma F. Application of Compost and Biochar with Brassica juncea L. to Reduce Phytoavailable Concentrations in a Settling Pond Mine Soil. **Waste and Biomass Valorization**, vol. 9, nº 5, p. 821–834, 9 maio 2018. <https://doi.org/10.1007/s12649-017-9843-y>.

FRANCO, Avílio A; CAMPOLLO, Eduardo F; DA SILVA, Elaine M R; DE FARIA, Sérgio M. Revegetação de solos degradados. , p. 1–9, 1992. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPAB-2010/27134/1/cot009.pdf>. Acessado em: 12 jan. 2024.

GAO, Ningbo; KAMRAN, Kamran; QUAN, Cui; WILLIAMS, Paul T. Thermochemical conversion of sewage sludge: A critical review. **Progress in Energy and Combustion Science**, , p. 100843, jul. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2020.100843>.

GILLER, K. E. (Org.). **Nitrogen fixation in tropical cropping systems**. UK: CABI Publishing, 2001. <https://doi.org/10.1079/9780851994178.0000>.

GOLDAN, Elena; NEDEFF, Valentin; BARSAN, Narcis; CULEA, Mihaela; TOMOZEI, Claudia; PANAINTE-LEHADUS, Mirela; MOSNEGUTU, Emilian. Evaluation of the Use of Sewage Sludge Biochar as a Soil Amendment—A Review. **Sustainability**, vol. 14, nº 9, p. 5309, 28 abr. 2022. <https://doi.org/10.3390/su14095309>.

GONZAGA, Maria Isidória Silva; MACKOWIAK, Cheryl; ALMEIDA, André Quintão de; CARVALHO JÚNIOR, José Ilmar Tínel de. BIOCARVÃO DE LODO DE ESGOTO E SEU EFEITO NO CRESCIMENTO E NAS CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DE MUDAS DE EUCALIPTO (*Eucalyptus grandis* W.Hill ex Maiden). **Ciência Florestal**, vol. 28, nº 2, p. 687–695, 29 jun. 2018. <https://doi.org/10.5902/1980509832067>.

HALECKI, Wiktor; KLATKA, Sławomir. Aplication of Soil Productivity Index after Eight Years of Soil Reclamation with Sewage Sludge Amendments. **Environmental Management**,

vol. 67, nº 5, p. 822–832, 18 maio 2021. <https://doi.org/10.1007/s00267-020-01422-1>.

HAZRATI, Sajjad; FARAHBAKHS, Mohsen; CERDÀ, Artemi; HEYDARPOOR, Ghasem. Functionalization of ultrasound enhanced sewage sludge-derived biochar: Physicochemical improvement and its effects on soil enzyme activities and heavy metals availability. **Chemosphere**, vol. 269, p. 128767, abr. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128767>.

HOWARD, ALBERT. Manufacture of Humus by the Indore Process. **Journal of the Royal Society of Arts**, vol. 184, nº 4331, p. 26–59, 1 fev. 1935. <https://doi.org/10.1038/137363b0>.

IBGE. **Informações técnicas e legais para a utilização dos dados publicados**. Nota metodológica nº 01/2023. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. 39p. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101998.pdf>. Acesso em: 20/03/2024.

IPECE. **Perfil básico municipal, Irauçuba**. Fortaleza: [s. n.], jan. 2017. Disponível em: [https://www.ipece.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/45/2018/09/Iraucuba\\_2017.pdf](https://www.ipece.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/45/2018/09/Iraucuba_2017.pdf). Acessado em: 1 maio 2024.

JIN, Junwei; LI, Yanan; ZHANG, Jianyun; WU, Shengchun; CAO, Yucheng; LIANG, Peng; ZHANG, Jin; WONG, Ming Hung; WANG, Minyan; SHAN, Shengdao; CHRISTIE, Peter. Influence of pyrolysis temperature on properties and environmental safety of heavy metals in biochars derived from municipal sewage sludge. **Journal of Hazardous Materials**, vol. 320, p. 417–426, dez. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.08.050>.

KEILA DA SILVA MACHADO; KÁTIA LUCIENE MALTONI; CINTHIA MONTIBELLER SANTOS; ANA MARIA RODRIGUES CASSIOLATO. RESÍDUOS ORGÂNICOS E FÓSFORO COMO CONDICIONANTES DE SOLO DEGRADADO E EFEITOS SOBRE O CRESCIMENTO INICIAL DE *Dipteryx alata* Vog. **Ciência Florestal**, vol. 24, p. 541–552, jul. 2014. <https://doi.org/https://doi.org/10.1590/1980-509820142403003>.

KHAN, Ramsha; SHUKLA, Saurabh; KUMAR, Manish; ZUORRO, Antonio; PANDEY, Ashok. Sewage sludge derived biochar and its potential for sustainable environment in circular economy: Advantages and challenges. **Chemical Engineering Journal**, vol. 471, p. 144495,

set. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.144495>.

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. 2. ed. Madison, American Society of Agronomy: Soil Science Society of America, 1986. p. 635-662. (Agronomy Monography, 9).

KULKARNI, Shubham S.; MAYILSWAMY, Neelaambhigai; SIDHARTH, Sumati; SUBASH, Alsha; SATAPATHY, Anwesha; KANDASUBRAMANIAN, Balasubramanian. Sustainable Wastewater Management via Biochar Derived from Industrial Sewage Sludge. **Circular Economy and Sustainability**, vol. 4, nº 1, p. 163–200, 29 mar. 2024. <https://doi.org/10.1007/s43615-023-00273-2>.

LACERDA, Sara Moreno Pereira; SILVA, Joseane Oliveira da; ROCHA, Felizardo Adenilson; OLIVEIRA, Jacson Tavares de; SILVA, Thamires Oliveira da; NORONHA, Rafael Henrique de Freitas; ALMEIDA, Thavane Ferreira de; FERRAZ, Lorena Lima. Reaproveitamento do lodo de esgoto da ETE do Município de Vitória Da Conquista na produção de mudas da Leucanthemum maximum / Reuse of sewage sludge from the ETE in the city of Vitória da Conquista in the production of seedlings for Leucanthemum maximum. **Brazilian Journal of Development**, vol. 8, nº 1, p. 1279–1288, 7 jan. 2022. <https://doi.org/10.34117/bjdv8n1-082>.

LAL, R. Soil degradation by erosion. **Land Degradation & Development**, vol. 12, nº 6, p. 519–539, 4 nov. 2001. <https://doi.org/10.1002/ldr.472>.

LEHMANN, Johannes; RILLIG, Matthias C.; THIES, Janice; MASIELLO, Caroline A.; HOCKADAY, William C.; CROWLEY, David. Biochar effects on soil biota – A review. **Soil Biology and Biochemistry**, vol. 43, nº 9, p. 1812–1836, set. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.04.022>.

LEONARD MLODINOW. **O andar do bêbado: como o acaso determina nossas vidas**. 1º ed. Rio de Janeiro: [s. n.], 2009. vol. 1, .

LI, Pengfei; ZHAO, Hao; CHENG, Chongbo; HOU, Tingting; SHEN, Dekui; JIAO, Youzhou. A review on anaerobic co-digestion of sewage sludge with other organic wastes for methane production: Mechanism, process, improvement and industrial application. **Biomass and**

**Bioenergy**, vol. 185, p. 107241, jun. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107241>.

LIMA, Antonio Yan Viana; CHERUBIN, Maurício Roberto; DA SILVA, Danilo Ferreira; MOTA, Jaedson Cláudio Anunciato; SILVA, Francisco Gilcivan Moreira; DE ARAUJO, Ademir Sérgio Ferreira; MELO, Vania Maria Maciel; VERMA, Jay Prakash; DE ARAUJO PEREIRA, Arthur Prudêncio. Grazing exclusion restores soil health in Brazilian drylands under desertification process. **Applied Soil Ecology**, vol. 193, p. 105107, jan. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.105107>.

MAIA, Ericka Paloma Viana; GARCIA, Kaio Gráculo Vieira; DE SOUZA OLIVEIRA FILHO, José; PINHEIRO, José Israel; FILHO, Paulo Furtado Mendes. Co-inoculation of Rhizobium and Arbuscular Mycorrhiza Increases Mimosa caesalpiniaefolia Growth in Soil Degraded by Manganese Mining. **Water, Air, & Soil Pollution**, vol. 234, nº 5, p. 289, 22 maio 2023. <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06314-8>.

MALAVOLTA, E.; VITTI, Godofredo César; OLIVEIRA, Sebastião Alberto de. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. **Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato**, nº 2, p. 319, 1997. .

**MAPA. MANUAL DE MÉTODOS ANALÍTICOS OFICIAIS PARA FERTILIZANTES E CORRETIVOS.** 1º ed. Brasilia: Biblioteca Nacional de Agricultura – BINAGRI, 2017. vol. 1, .

MARIANO, Denis A.; SANTOS, Carlos A.C. dos; WARDLOW, Brian D.; ANDERSON, Martha C.; SCHILTMEYER, Allie V.; TADESSE, Tsegaye; SVOBODA, Mark D. Use of remote sensing indicators to assess effects of drought and human-induced land degradation on ecosystem health in Northeastern Brazil. **Remote Sensing of Environment**, vol. 213, p. 129–143, ago. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.04.048>.

MARTINS, Carla Andreia da Cunha; SANTOS, Fabiana Soares dos; PORTZ, Adriano; SANTOS, André Marques dos. Desenvolvimento inicial do milho (*Zea mays L.*) em substrato contendo lodo de esgoto compostado. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais (Online)**, nº 48, p. 69–79, jun. 2018. <https://doi.org/10.5327/Z2176-947820180305>.

MEDINA, Jorge; MONREAL, Carlos; BAREA, José Miguel; ARRIAGADA, César; BORIE, Fernando; CORNEJO, Pablo. Crop residue stabilization and application to agricultural and degraded soils: A review. **Waste Management**, vol. 42, p. 41–54, ago. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.04.002>.

MENDONÇA, Eduardo de Sá; MATOS, Eduardo da Silva. **Matéria Orgânica do Solo: Métodos de Análises**. 1º ed. Ponte Nova: D&M Gráfica e Editora LTDA, 2005. vol. 1, .

MOREIRA, Paulo Roberto. **Manejo do solo e recomposição da vegetação com vistas a recuperação de áreas degradadas pela extração de bauxita, Poços de Caldas, MG**. 2004. 139 f. Tese de doutorado – Universidade Estadual Paulista (Unesp), Rio Claro, 2004.

MOREIRA, Rodrigo Santos; LENSE, Guilherme Henrique Expedito; FÁVERO, Leonardo Ferreira; OLIVEIRA JUNIOR, Benedito Majela de; MINCATO, Ronaldo Luiz. Nutritional status and physiological parameters of maize cultivated with sewage sludge. **Ciência e Agrotecnologia**, vol. 44, 2020. <https://doi.org/10.1590/1413-7054202044029919>.

Ministério do Meio Ambiente (Brasil). **Resíduos dos Serviços de Saneamento Básico**. SINIR - Sistema Nacional de Informações sobre Resíduos Sólidos. Disponível em: <https://sinir.gov.br/informacoes/tipos-de-residuos/residuos-dos-servicos-de-saneamento-basico/>. Acesso em: 13/03/2023.

MUBASHIR, Muhammad; YEONG, Yin Fong; BINTI MOHAMED NAZRI, Nur Syahirah; LAU, Kok Keong. Accelerated synthesis of deca-dodecasil 3 rhombohedral (DDR3) zeolite crystals via hydrothermal growth coupled with ultrasonic irradiation method. **RSC Advances**, vol. 5, nº 29, p. 22658–22664, 2015. <https://doi.org/10.1039/C5RA00009B>.

MUJTABA MUNIR, Mehr Ahmed; YOUSAF, Balal; ALI, Muhammad Ubaid; DAN, Chen; ABBAS, Qumber; ARIF, Muhammad; YANG, Xiaoe. In situ synthesis of micro-plastics embedded sewage-sludge co-pyrolyzed biochar: Implications for the remediation of Cr and Pb availability and enzymatic activities from the contaminated soil. **Journal of Cleaner Production**, vol. 302, p. 127005, jun. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127005>.

MYSZURA-DYMEK, Magdalena; ŽUKOWSKA, Grażyna. The Influence of Sewage Sludge

Composts on the Enzymatic Activity of Reclaimed Post-Mining Soil. **Sustainability**, vol. 15, nº 6, p. 4749, 7 mar. 2023. <https://doi.org/10.3390/su15064749>.

NOVOTNY, Etevino Henrique; MAIA, Claudia Maria Branco de Freitas; CARVALHO, Márcia Thaís de Melo; MADARI, Beáta Emöke. BIOCHAR: PYROGENIC CARBON FOR AGRICULTURAL USE - A CRITICAL REVIEW. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, vol. 39, nº 2, p. 321–344, abr. 2015. <https://doi.org/10.1590/01000683rbcs20140818>.

NYASHANU, Pauline N.; SHAFODINO, Festus S.; MWAPAGHA, Lamech M. Determining the potential human health risks posed by heavy metals present in municipal sewage sludge from a wastewater treatment plant. **Scientific African**, vol. 20, p. e01735, jul. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2023.e01735>.

OLHER, Izabella; SIQUEIRA, Marcos Vinícius Bohrer Monteiro; COSTA, Gustavo Henrique Gravatim; LOBO, Thomaz Figueiredo. Crescimento de mudas de pau viola (*Cytharexylum myrianthum*) são potencializadas utilizando resíduos do tratamento de esgoto doméstico. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, vol. 8, nº 4, p. 304–310, 11 out. 2020. <https://doi.org/10.20873/jbb.uft.cemaf.v8n4.olher>.

PENIDO, Evanise Silva; MARTINS, Gabriel Caixeta; MENDES, Thiago Borges Matos; MELO, Leônidas Carrijo Azevedo; DO ROSÁRIO GUIMARÃES, Iara; GUILHERME, Luiz Roberto Guimarães. Combining biochar and sewage sludge for immobilization of heavy metals in mining soils. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, vol. 172, p. 326–333, maio 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.01.110>.

PIMENTEL, David. Soil Erosion: A Food and Environmental Threat. **Environment, Development and Sustainability**, vol. 8, nº 1, p. 119–137, fev. 2006. <https://doi.org/10.1007/s10668-005-1262-8>.

QAMBRANI, Naveed Ahmed; RAHMAN, Md. Mukhlesur; WON, Seunggun; SHIM, Soomin; RA, Changsix. Biochar properties and eco-friendly applications for climate change mitigation, waste management, and wastewater treatment: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 79, p. 255–273, nov. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.057>.

RAJKOVICH, Shelby; ENDERS, Akio; HANLEY, Kelly; HYLAND, Charles; ZIMMERMAN, Andrew R.; LEHMANN, Johannes. Corn growth and nitrogen nutrition after additions of biochars with varying properties to a temperate soil. **Biology and Fertility of Soils**, vol. 48, nº 3, p. 271–284, 1 abr. 2012. <https://doi.org/10.1007/s00374-011-0624-7>.

ROBERTSON, J.B.; SOEST, P.J. Van. The detergent system of analysis and its application to human foods. In: JAMES, W.P.T.; THEANDER, O. (orgs.). **The Analysis of Dietary Fibre in Food**. 1º ed. New York: Marcel Dekker, 1981. vol. 1, p. 123–157.

RStudio Team. RStudio: Integrated development environment for R. RStudio, PBC, versão 2023. Disponível em: <https://www.rstudio.com/>. Acesso em: 09/02/2024

SANTOS, Adriana Delfino dos; COCIONE, Aline Renée; VITTI, André César; BOARETTO, Antônio Enedi; COELHO, Antonio Marcos; RAIJ, Bernardo van; SILVA, Carlos Alberto; ABREU JUNIOR, Cassio Hamilton; CARMO, Ciríaca A. F. Santana do; SILVA, Claudineia Rodrigues da; ABREU, Cláide Aparecida de; GIANELLO, Clésio; ANDRADE, Cristiano Alberto de; PÉREZ, Daniel Vidal; CASARINI, Dorothy C. Pinatti; SILVA, Fábio Cesar da; PRATO, Fábio; CARVALHO, Fernando de Campos; SANTOS, Gláucia Cacília Gabrielli dos; ... BARRETO, Washington de Oliveira. **Manual de análises químicas de solos plantas e fertilizantes**. 2º ed. Brasília: Embrapa, 2009. vol. 1, .

SINGH, Balwant; ARBESTAIN, Marta Camps,; LEHMANN, Johannes. **Biochar: A Guide to Analytical Methods**. 1º ed. Clayton South: Csiro Publishing, 2017. vol. 34, . <https://doi.org/10.1111/sum.12389>.

SINGH, Simranjeet; KUMAR, Vijay; DHANJAL, Daljeet Singh; DATTA, Shivika; BHATIA, Deepika; DHIMAN, Jaskaran; SAMUEL, Jastin; PRASAD, Ram; SINGH, Joginder. A sustainable paradigm of sewage sludge biochar: Valorization, opportunities, challenges and future prospects. **Journal of Cleaner Production**, vol. 269, p. 122259, out. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122259>.

SIQUEIRA, David Pessanha; BARROSO, Deborah Guerra; WEISS DE CARVALHO, Giovanna Campos Mamede; 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**, vol. 29, nº 2, p. 728–739, 30 jun. 2019. <https://doi.org/10.5902/1980509827297>.

SOUZA, Maurício Novaes; NASCIMENTO, Priscila de Oliveira; MONTEIRO, Roney José; TRUGILHO, Guilherme Andrião; MOREIRA, Mauricio Ferreira; LOUBACK, Geisa Corrêa; CRESPO, Aline Marchiori; PERON, Igor Borges; COSTA, Willian Moreira da; FIGUEIREDO, João Sávio Monção. Revegetação, matéria orgânica e a sustentabilidade nos procedimentos de recuperação de solos degradados. **Tópicos em recuperação de áreas degradadas Vol 6.** Canoas, RS, Brazil: Mérida Publishers, 2023. p. 72–93. <https://doi.org/10.4322/mp.978-65-84548-14-5.c2>.

STAGNARI, Fabio; MAGGIO, Albino; GALIENI, Angelica; PISANTE, Michele. Multiple benefits of legumes for agriculture sustainability: an overview. **Chemical and Biological Technologies in Agriculture**, vol. 4, nº 1, p. 2, 2 dez. 2017. <https://doi.org/10.1186/s40538-016-0085-1>.

TEIXEIRA, Paulo César; DONAGEMMA, Guilherme Kangussu; FONTANA, Ademir; TEIXEIRA, Wenceslau Geraldes. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3º ed. Brasília: Embrapa, 2017. vol. 1, .

VAN SOEST, P. J. Development of a Comprehensive System of Feed Analyses and its Application to Forages. **Journal of Animal Science**, vol. 26, nº 1, p. 119–128, 1 jan. 1967. <https://doi.org/10.2527/jas1967.261119x>.

VAN SOEST, P J; WINE, R H. Determination of Lignin and Cellulose in Acid-Detergent Fiber with Permanganate. **Journal of AOAC INTERNATIONAL**, vol. 51, nº 4, p. 780–785, 1 jul. 1968. <https://doi.org/10.1093/jaoac/51.4.780>.

WANG, Teng; CHEN, Yuchi; LI, Jinping; XUE, Yongjie; LIU, Jingxin; MEI, Meng; HOU, Haobo; CHEN, Si. Co-pyrolysis behavior of sewage sludge and rice husk by TG-MS and residue analysis. **Journal of Cleaner Production**, vol. 250, p. 119557, mar. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119557>.

WANG, Zhipu; LIU, Kai; XIE, Like; ZHU, Henan; JI, Shibo; SHU, Xinqian. Effects of

residence time on characteristics of biochars prepared via co-pyrolysis of sewage sludge and cotton stalks. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, vol. 142, p. 104659, set. 2019.  
DOI 10.1016/j.jaat.2019.104659. Disponível em:  
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0165237018310994>.

WANG, Zhipu; XIE, Like; LIU, Kai; WANG, Jian; ZHU, Henan; SONG, Qiang; SHU, Xinjian. Co-pyrolysis of sewage sludge and cotton stalks. **Waste Management**, vol. 89, p. 430–438, abr. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.04.033>.

XING, Jia; XU, Guoren; LI, Guibai. Comparison of pyrolysis process, various fractions and potential soil applications between sewage sludge-based biochars and lignocellulose-based biochars. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, vol. 208, p. 111756, jan. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111756>.

YANG, Jun; LAN, Liying; JIN, Yue; YU, Nan; WANG, Dong; WANG, Ertao. Mechanisms underlying legume–rhizobium symbioses. **Journal of Integrative Plant Biology**, vol. 64, nº 2, p. 244–267, 26 fev. 2022. <https://doi.org/10.1111/jipb.13207>.

ZOROUFCHI BENIS, Khaled; MOTALEBI DAMUCHALI, Ali; SOLTAN, Jafar; MCPHEDRAN, Kerry Neil. Treatment of aqueous arsenic – A review of biochar modification methods. **Science of The Total Environment**, vol. 739, p. 139750, out. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139750>.

## ANEXO A - AUTORIZAÇÃO DE PUBLICAÇÃO CONCEDIDA PELO FINANCIADOR DO PROJETO DE PESQUISA QUE DEU ORIGEM À MONOGRAFIA

Av. Dr. Lauro Vieira Chaves, 1030 - Vila União  
CEP: 60422-901 - Fortaleza / CE  
CNPJ: 07.040.108/0001-57



### TERMO DE AUTORIZAÇÃO

A Companhia de Água e Esgoto do Ceará – Cagece, sociedade de economia mista inscrita no CNPJ sob o número 07.040.108/0001-57, com sede na av. Doutor Lauro Vieira Chaves, nº 1030 – Vila União, Fortaleza/CE, CEP 60.422-901, por meio da sua Gerência de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação, representada pela gerente Cailiny Darley de Menezes Medeiros, vem, neste ato, considerando:

1. O Convênio de Receita para pesquisa voltada ao desenvolvimento de tecnologia entre a FUNCAP e a Cagece, publicado em DOE em 01/12/2020 (Extrato de Convênio 01/2020), que estabelece condições para que a Funcap selecione e apoie pesquisa científica e tecnológica cooperativa, a ser desenvolvida no Estado do Ceará, por pesquisadores vinculados a Instituições de Ensino Superior (IES) e/ou Instituições Científicas, Tecnológicas e de Inovação (ICT) ou por empresas, públicas ou privadas, selecionados mediante Chamada de Proposta de Pesquisa, com apporte de recursos da Cagece e Funcap, no valor total de R\$ 4.000.000,00 (quatro milhões de reais), sendo R\$ 3.000.000,00 com recursos próprios da Cagece e o restante pela FUNCAP;
2. Que a pesquisa “PRODUÇÃO DE MATERIAIS CARBONÁCEOS FUNCIONAIS PARA VALORAÇÃO DO LODO DE ESGOTO”, coordenada pela Prof. Mirian Cristina Gomes Costa foi selecionada mediante a Chamada de Proposta de Pesquisa;
3. As disposições acerca das confidencialidades previstas na cláusula 5ª (quinta) do referido Convênio;
4. A previsão de sigilo expressa no Termo de Concessão assinado pelo coordenador da referida pesquisa, a ser estendido a toda equipe envolvida no projeto de pesquisa;
5. Que a realização do trabalho envolve equipe composta por professores e alunos de cursos de graduação e pós-graduação;
6. Que o Trabalho de Conclusão de Curso intitulado DESENVOLVIMENTO INICIAL DE LEGUMINOSA EM SOLO DEGRADADO TRATADO COM RESÍDUOS ORGÂNICOS E BIOCARBÃO, do(a) aluno(a) Renan Gomes Costa, orientado pela Prof. Mirian Cristina Gomes Costa, atuante da pesquisa em questão, adotou informações cedidas pela Cagece;
7. Que o coordenador informou não haver previsão de propriedade intelectual na referida pesquisa;
8. Que o trabalho foi analisado pela equipe da Cagece e sua redação acatada;

Autorizamos a publicação do trabalho de conclusão de curso referenciado no item 6 (seis) do presente Termo de Autorização conforme preceitua a cláusula 5ª (quinta) do Convênio de Receita firmado entre a Funcap e a Cagece.

Fortaleza, 28 de agosto de 2024

Cailiny Darley de M. Medeiros

**Gerente de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação – GEPED**