



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE - UFS

CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA

MARCOS HENRIQUE CARDOSO SOUZA FEITOSA

**LUBRIFICANTE SECO À BASE DE BIOCHAR DE RESÍDUO DE COCO
VERDE E FÉCULA DE MANDIOCA COMO ALTERNATIVA SUSTENTÁVEL
AO GRAFITE NO TRATAMENTO DE SEMENTES**

SÃO CRISTÓVÃO

2026

MARCOS HENRIQUE CARDOSO SOUZA FEITOSA

**LUBRIFICANTE SECO À BASE DE BIOCHAR DE RESÍDUO DE COCO
VERDE E FÉCULA DE MANDIOCA COMO ALTERNATIVA SUSTENTÁVEL
AO GRAFITE NO TRATAMENTO DE SEMENTES**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Departamento de
Engenharia Ambiental e sanitária, da
Universidade Federal de Sergipe, como
parte dos requisitos para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia
Ambiental e Sanitária.

Orientadora: Prof. Dr^a. Maria Isidoria Silva Gonzaga

Prof. Dr^a. Maria Isidoria Silva Gonzaga

(Orientadora)

Prof. Dr^a. Inaura Carolina Carneiro da Rocha Mr. Kelianne Carolina Targino de Araujo

(Banca examinadora)

(Banca examinadora)

RESUMO

O grafite é amplamente utilizado como lubrificante seco no tratamento de sementes para melhorar a fluidez durante a semeadura. Entretanto, seu custo elevado e os impactos ambientais associados à sua obtenção estimulam a busca por alternativas mais sustentáveis. Neste estudo, avaliou-se a viabilidade do uso de biochar produzido a partir de resíduos de coco verde, isoladamente e em combinação com fécula de mandioca, como substituto do grafite no tratamento de sementes. Os ensaios foram conduzidos utilizando sementes de feijão-fradinho como modelo experimental. Foram realizados testes de fluidez, germinação e capacidade de retenção de água, além de análises econômica e ambiental. Os resultados demonstraram que as formulações contendo biochar e fécula apresentaram desempenho de fluidez semelhante ao do grafite. Destacou-se a formulação composta por biochar e fécula de mandioca, que atingiu 100% de germinação no quinto dia de avaliação e manteve a qualidade fisiológica das sementes. O biochar apresentou rendimento de 43,5% e capacidade de retenção de água de 5,2 mL g⁻¹. A análise econômica indicou redução de até 70% nos custos com lubrificantes utilizados na semeadura. Além disso, o reaproveitamento do resíduo de coco verde contribui para a valorização de um passivo ambiental e para a redução dos impactos associados à sua disposição em aterros sanitários. Conclui-se que o biochar de coco verde, especialmente quando combinado à fécula de mandioca, constitui uma alternativa tecnicamente viável, economicamente atrativa e ambientalmente sustentável para substituição parcial ou total do grafite no tratamento de sementes.

Palavras-chave: Pirólise; Resíduos orgânicos; Cocoicultura; Teste de fluidez; Lubrificante seco; Semeadura.

1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional global tem intensificado a demanda por alimentos, fibras e outros produtos de origem agrícola, exercendo crescente pressão sobre os sistemas produtivos. Nesse contexto, torna-se necessário o desenvolvimento e a aplicação de tecnologias que promovam o aumento da produtividade e a eficiência no uso de recursos naturais. Projeções da Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO, 2009) indicam que a população mundial poderá atingir cerca de 9 bilhões de pessoas até 2050, reforçando a necessidade de intensificação sustentável da produção agrícola.

Dentre as principais culturas agrícolas, a soja destaca-se como uma das mais relevantes no cenário brasileiro, apresentando elevada participação na economia e ampla área cultivada. Em 2024, a produção nacional foi estimada em aproximadamente 144,5 milhões de toneladas, em uma área superior a 46 milhões de hectares, consolidando-se como o principal produto agrícola do país (IBGE, 2025). Nesse contexto, a eficiência das operações de semeadura torna-se fundamental para o sucesso da produção, influenciando diretamente o estabelecimento da lavoura e o potencial produtivo das culturas.

Uma das práticas mais importantes nesse processo é o tratamento de sementes, que consiste na aplicação de produtos fitossanitários e micronutrientes com o objetivo de proteger as sementes contra patógenos e pragas, além de favorecer o desenvolvimento inicial das plantas (Santos et al., 2021). Apesar dos benefícios agrônômicos, a aplicação desses insumos pode alterar as propriedades físicas das sementes, aumentando a rugosidade superficial e reduzindo sua fluidez durante a semeadura.

A fluidez das sementes é um fator determinante na semeadura mecanizada, pois está diretamente relacionada à uniformidade de distribuição no solo. A redução dessa propriedade pode comprometer o desempenho dos mecanismos de distribuição, resultando em falhas ou deposições múltiplas, o que afeta o estande final de plantas e, consequentemente, a produtividade das culturas (Mota & Lima, 2025).

Nesse contexto, o uso de grafite como lubrificante sólido é amplamente adotado devido à sua capacidade de reduzir o atrito entre sementes e componentes das semeadoras, promovendo melhor escoamento e maior uniformidade no plantio (Savi et al., 2020; Savi et al., 2023). No entanto, apesar de sua eficiência operacional, o grafite apresenta limitações importantes. Por se tratar de um material mineral inerte, sua atuação restringe-se à melhoria da fluidez, não proporcionando benefícios adicionais ao desenvolvimento

das plantas. Além disso, sua cadeia produtiva está associada a impactos ambientais decorrentes da atividade mineradora, como degradação do solo, consumo de recursos naturais e emissão de poluentes (Wu et al., 2023). Soma-se a isso o fato de ser um recurso não renovável, cuja utilização no tratamento de sementes representa o emprego de um insumo finito em uma aplicação de uso único, uma vez que, após a semeadura, o material é incorporado ao solo sem possibilidade de reaproveitamento.

Diante dessas limitações, alternativas sustentáveis têm sido investigadas, dentre as quais se destaca o biochar, material obtido a partir da pirólise de biomassa, em condições de baixa disponibilidade de oxigênio. Propriedades físicas como elevada porosidade, elevada área superficial e grande capacidade de retenção de água potencializam o uso do biochar para o tratamento de sementes, melhorando a fluidez ao mesmo tempo em que promovem benefícios agrônômicos (Lehmann; Joseph, 2015; Zhang et al., 2022; Banu et al., 2022).

Paralelamente, a crescente geração de resíduos agroindustriais tem impulsionado a busca por soluções que promovam seu reaproveitamento. O resíduo de coco verde destaca-se nesse contexto, especialmente em regiões litorâneas, devido ao elevado volume gerado e à dificuldade de manejo. No Nordeste brasileiro, esse material representa um passivo ambiental significativo, sendo frequentemente descartado de forma inadequada ou destinado a aterros sanitários.

No contexto local, o município de Aracaju apresenta elevada geração de resíduos de coco verde, estimada em aproximadamente 190 a 200 toneladas semanais, o que resulta em custos anuais entre R\$ 900 mil e R\$ 1 milhão para o poder público (Emsurb, 2025). Além do impacto econômico, o acúmulo desse resíduo pode favorecer a contaminação do solo e da água, bem como a proliferação de vetores de doenças. Quando destinado a aterros sanitários, sua decomposição em condições anaeróbias contribui para a emissão de CH₄ (metano), um gás de efeito estufa com potencial de aquecimento global aproximadamente 28 vezes superior ao do CO₂ (dióxido de carbono), considerando um horizonte de 100 anos (IPCC, 2006). Dessa forma, mesmo quando corretamente destinados, esses resíduos continuam contribuindo para impactos ambientais relevantes.

A conversão do resíduo de coco verde em biochar surge como uma estratégia promissora para o aproveitamento desse material, possibilitando a redução do volume destinado aos aterros, a mitigação de impactos ambientais e a agregação de valor a um passivo urbano.

Outro produto potencialmente viável para o tratamento de sementes visando o aumento da fluidez durante a semeadura é a fécula de mandioca. Além de ser abundante na região Nordeste (IBGE, 2023), a fécula apresenta características como granulometria fina, elevada capacidade de adesão e biodegradabilidade, podendo atuar como agente aglutinante em formulações para tratamento de sementes. Sua utilização em conjunto com o biochar pode favorecer a formação de um sistema híbrido capaz de otimizar o revestimento das sementes e melhorar a fluidez.

Apesar dos avanços no uso de biochar em aplicações agrícolas, ainda são escassos os estudos que investigam o uso do biochar de coco verde como lubrificante seco no tratamento de sementes, especialmente quando associado à fécula de mandioca. Além disso, são limitadas as abordagens que avaliam, de forma integrada, os impactos ambientais e econômicos dessa substituição, incluindo a redução de emissões de gases de efeito estufa associadas à destinação de resíduos, o aumento da vida útil de aterros sanitários e os potenciais ganhos econômicos ao longo da cadeia produtiva.

Além disso, o presente estudo apresenta alinhamento com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS, 2015) propostos pela Organização das Nações Unidas (ONU), inserindo-se em uma abordagem integrada de sustentabilidade. Destacam-se as contribuições para a ODS 2 (Fome Zero e Agricultura Sustentável), ao propor melhorias no desempenho inicial das culturas; para a ODS 6 (Água Potável e Saneamento), ao reduzir potenciais fontes de contaminação ambiental; para a ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura), por meio do desenvolvimento de uma alternativa tecnológica; para a ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis), ao contribuir para a redução da pressão sobre aterros sanitários; para a ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis), ao promover o reaproveitamento de resíduos agroindustriais; e para a ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima), ao mitigar a emissão de gases de efeito estufa associados à decomposição de resíduos orgânicos.

Diante desse cenário, a utilização do biochar de resíduo de coco verde como lubrificante seco no tratamento de sementes apresenta potencial não apenas como alternativa técnica ao grafite, mas também como estratégia integrada de mitigação de impactos ambientais e redução de custos. Nesse contexto, o objetivo deste estudo foi desenvolver um lubrificante seco à base de biochar de resíduo de coco verde e fécula de mandioca como alternativa sustentável ao grafite no tratamento de sementes. Para isso, foram avaliados o desempenho das formulações quanto à fluidez, à germinação de sementes de feijão-fradinho (em virtude da sua semelhança com a soja) e à capacidade de

retenção de água do biochar. Além disso, foram estimados os benefícios ambientais associados ao aproveitamento do resíduo de coco verde, incluindo a redução potencial das emissões de metano, o aumento da vida útil de aterros sanitários e a economia para o poder público municipal, bem como a viabilidade econômica da substituição parcial ou total do grafite em escala produtiva.

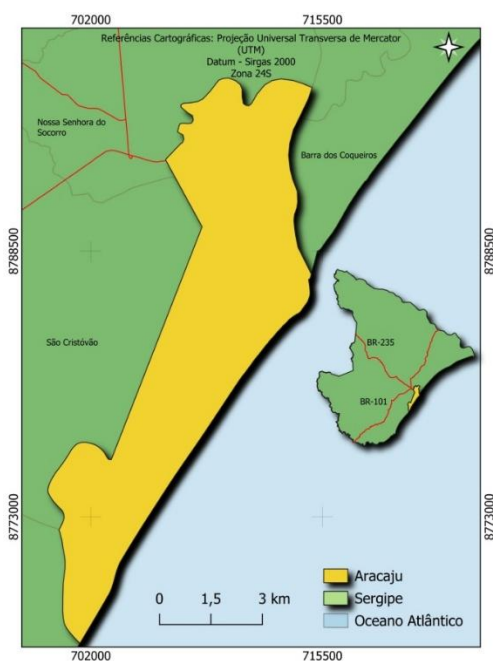
2 METODOLOGIA

2.1 Área de Estudo

O estudo foi desenvolvido com base no município de Aracaju, capital do estado de Sergipe (SE), localizado na região Nordeste do Brasil, em área litorânea banhada pelo oceano Atlântico, conforme o mapa de localização apresentado na Figura 1. O município possui área territorial de aproximadamente 182 km² e população de cerca de 600 mil habitantes, segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2023).

A escolha da área de estudo justifica-se pela elevada geração de resíduos de coco verde no município, associada ao intenso consumo urbano e à relevância econômica e ambiental na gestão de resíduos sólidos locais. Dessa forma, Aracaju configura-se como um cenário representativo para a avaliação de estratégias de reaproveitamento desse material, especialmente no que se refere à redução de impactos ambientais e custos públicos.

Figura 1. Mapa de localização



Fonte: Autor (2026)

2.2 Produção de biochar e preparo dos tratamentos

O biochar foi produzido a partir de resíduos de coco verde coletados em estabelecimentos comerciais, feiras livres e na Universidade Federal de Sergipe, nos municípios de Aracaju e São Cristóvão (SE). Inicialmente, o material foi submetido à trituração em equipamento da marca CID, modelo 10079, equipado com conjunto de facas rotativas em disco. Em seguida, o resíduo foi disposto em bancada de estufa agrícola, onde permaneceu em processo de secagem por 30 dias.

Após a secagem, o material foi submetido ao processo de pirólise em forno mufla da marca Fornos Lavoisier (modelo 402D, AMP-18), à temperatura de 500 °C por 15 minutos, em condições de baixa disponibilidade de oxigênio. Após o resfriamento à temperatura ambiente, foi determinada a eficiência de produção do biochar com base na relação entre a massa de biomassa seca ou matéria prima (MMP) e a massa final obtida após a pirólise, ou massa do biochar (MB). A eficiência de produção (rendimento) do biochar foi determinada conforme a Equação (1):

$$\text{Rendimento (\%)} = (\text{MB (g)} / \text{MMP (g)}) \times 100 \quad (1)$$

O material pirolizado foi então moído e peneirado em malhas variando de 1 mm a 53 µm, com o objetivo de obtenção de diferentes granulometrias para os ensaios. A Figura 2 mostra a sequência do processo para a produção de biochar.

Figura 2. Processo para a produção de biochar



A estimativa da capacidade de produção de biochar a partir do resíduo de coco verde foi realizada com base na conversão da massa do resíduo in natura para base seca e no rendimento obtido experimentalmente. Para isso, considerou-se a geração anual de resíduos de coco verde no município de Aracaju, bem como o teor médio de umidade desse material, que segundo Ferreira et al. (2025), a umidade da casca do coco verde in natura situa-se na faixa de 85–90%; neste trabalho, adotou-se o valor de 85% para os cálculos. Inicialmente, a massa de matéria seca foi estimada a partir da Equação 2:

$$\text{Matéria seca (t ano}^{-1}\text{)} = \text{Massa in natura} \times \text{fração de matéria seca} \quad (2)$$

Em seguida, a produção potencial de biochar foi determinada com base no rendimento obtido experimentalmente, conforme a Equação 3:

$$\text{Produção de biochar (t ano}^{-1}\text{)} = \text{Matéria seca} \times \text{rendimento do biochar} \quad (3)$$

Essas estimativas foram utilizadas para avaliar o potencial de aproveitamento do resíduo de coco verde na produção de biochar em escala municipal.

A fécula de mandioca foi adquirida no Mercado Municipal de Aracaju, sendo utilizada na forma comercial, sem necessidade de preparo adicional. O material foi aplicado tanto isoladamente quanto em combinação com o biochar e grafite, conforme os tratamentos experimentais.

Embora o objetivo do estudo esteja relacionado à aplicação da tecnologia no tratamento de sementes de soja, durante a execução experimental não houve disponibilidade de sementes de soja para realização dos ensaios laboratoriais. Dessa forma, utilizaram-se sementes de feijão-fradinho (*Vigna unguiculata*), escolhidas em função da semelhança de tamanho, formato e comportamento físico em operações de tratamento e escoamento de sementes. A utilização desse material permitiu a avaliação comparativa da fluidez e dos efeitos dos lubrificantes secos em condições experimentais controladas.

Para o tratamento químico das sementes, foi utilizado o fungicida Vitavax-Thiram 200 SC, na dose de 5 mL kg⁻¹ de sementes, conforme recomendação do fabricante. A aplicação foi realizada no Laboratório de Remediação de Solos da Universidade Federal de Sergipe, com uso de capela de exaustão e equipamentos de proteção individual. Após a aplicação, as sementes foram acondicionadas em recipientes do tipo PET e submetidas

à agitação em agitador tipo Wagner por 30 minutos, com rotação de 30 rpm, visando à homogeneização do produto. Em seguida, as sementes contendo os tratamentos foram mantidas em repouso à temperatura ambiente para secagem natural.

2.3. Condução e avaliação do teste de fluidez

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado (DIC), com 11 tratamentos e 10 repetições, no total de 111 unidades experimentais. Após o tratamento químico, as sementes foram separadas em porções de 200 g, sendo adicionados os diferentes lubrificantes secos conforme os tratamentos experimentais. A incorporação dos materiais foi realizada em agitador tipo Wagner por 15 minutos. Inicialmente, foi adotada concentração de 1% (m/m), porém, em função de problemas operacionais como aderência excessiva e obstrução do escoamento, a concentração foi ajustada para 0,5%, sendo esta definida como ideal para os ensaios finais. Paralelamente, a granulometria do biochar foi reduzida para 0,1 mm com o objetivo de melhorar a uniformidade do revestimento e o escoamento das sementes. Foram testados 11 tratamentos, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 – Descrição dos tratamentos experimentais utilizados no estudo.

Tratamento	Descrição
T0	Semente sem tratamento
T1	Tratamento convencional
T2	Tratamento + grafite
T3	Tratamento + biochar (<0,25 mm)
T4	Tratamento + biochar (<0,1 mm)
T5	Fécula
T6	Tratamento + biochar (<0,1 mm) + fécula
T7	Tratamento + biochar (<53 µm)
T7a	T7 com remoção do excesso
T8	Tratamento + biochar (<53 µm) + grafite

T9	Tratamento + biochar (<53 μm) + fécula
T10	Tratamento + fécula + grafite

Fonte: Autor (2026)

A Figura 3 apresenta as sementes após a aplicação de cada tratamento, permitindo a visualização das diferenças entre os revestimentos aplicados, especialmente em relação à coloração, espessura do recobrimento e presença de excesso superficial de lubrificante seco.

Figura 3. Sementes de feijão fradinho tratadas conforme os diferentes tratamentos experimentais (T0 a T10).



Fonte: Autor (2026)

Para avaliação da fluidez, foi utilizado um sistema composto por duas garrafas acopladas, no qual o escoamento das sementes ocorreu exclusivamente por ação da gravidade, conforme demonstrado na Figura 4. O procedimento consistiu em uma adaptação dos ensaios de fluxo gravitacional empregados para avaliação da fluidez de grãos e sementes, nos quais o tempo de descarga é utilizado como indicador da capacidade de escoamento do material (Kalantari, 2016). Nesse sistema, o tempo necessário para o escoamento completo das sementes de uma garrafa para outra foi cronometrado com auxílio de cronômetro manual, sendo utilizado como parâmetro comparativo entre os tratamentos.

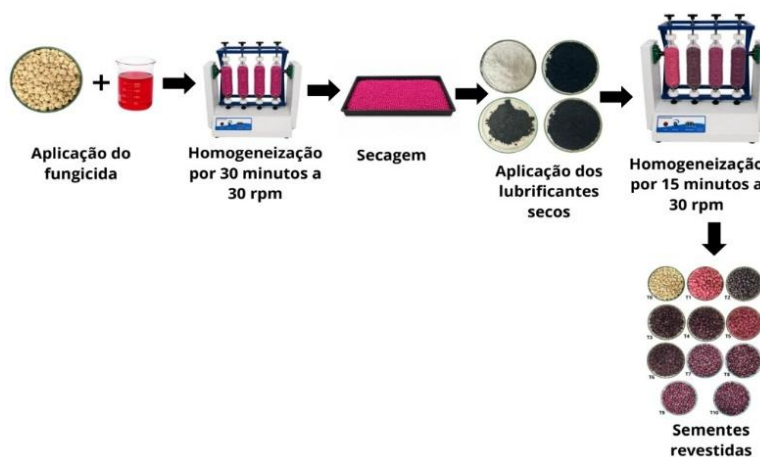
Figura 4. Escoamento das sementes de feijão fradinho entre as garrafas durante o teste de fluidez.



Fonte: Autor (2026)

Para garantir confiabilidade estatística e repetibilidade dos dados, foram adotadas 10 repetições por tratamento. As repetições permitiram avaliar com maior precisão a variabilidade entre os tratamentos quanto à fluidez, escoamento e preservação da integridade das sementes. A Figura 5 resume as etapas do teste de fluidez das sementes.

Figura 5. Etapas do teste de fluidez das sementes



Fonte: Autor (2026)

2.4. Avaliação da germinação das sementes submetidas aos diferentes tratamentos

O teste de germinação foi conduzido com base na metodologia de Rogovska et al. (2012), com adaptações. As sementes foram dispostas em papel germitest, utilizando 25 sementes por unidade experimental e quatro repetições por tratamento. Os rolos foram acondicionados em sacos plásticos e mantidos em câmara BOD a 25 °C, sob ausência de

luz. As avaliações foram realizadas no quinto e oitavo dias. Na primeira contagem, considerou-se germinada a semente que apresentou emissão da radícula primária. Na segunda contagem, verificou-se o desenvolvimento do sistema radicular, observando-se se houve crescimento em relação a primeira contagem, bem como a possível germinação de sementes que ainda não haviam emitido a radícula primária no quinto dia. Os resultados foram expressos em porcentagem de germinação.

2.5. Determinação da capacidade de retenção de água do biochar

A capacidade de retenção de água do biochar foi determinada por meio de ensaio de funil adaptado, com base na metodologia de Bhadha et al. (2017). Amostras de 7,01 g de biochar foram submetidas à adição de 60 mL de água destilada, permanecendo em repouso por 24 horas. Após esse período, foi realizada drenagem gravitacional por duas horas, sendo o volume de água escoado quantificado. Foi conduzido ensaio controle com papel filtro, e a retenção efetiva foi determinada pela diferença entre amostras e controle, sendo os resultados expressos em $\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$.

2.6. Análise econômica

A análise econômica foi realizada com base nos preços médios de mercado dos insumos utilizados: grafite em pó, fécula de mandioca e biochar de coco verde. Os valores foram coletados em sites de comércio agrícola e lojas especializadas. Ressalta-se que esses valores podem variar em função de fatores como região, fornecedor e escala de aquisição. Os valores de referência para o cálculo por quilograma estão dispostos na Tabela 2.

Tabela 2: Valores de referência dos insumos utilizados.

Material	Unidade	Preço (R\$)
Grafite em pó	kg	50,00
Fécula de mandioca	kg	4,99
Biochar de coco verde	kg	25,00

Fonte: Autor (2026)

As estimativas de emissão de CH_4 associadas à disposição de resíduos de coco verde em aterro sanitário foram realizadas com base na metodologia proposta pelo IPCC

(2006), utilizando abordagem de balanço de massa para resíduos sólidos urbanos, conforme a Equação 4.

$$\text{Emissão de CH}_4 = \text{MSW} \times \text{DOC} \times \text{DOCf} \times F \times 16/12$$

(4)

Onde:

MSW – Geração de resíduo de coco verde (t ano^{-1})

DOC – Valor de carbono orgânico degradável (%)

DOCf – Fração efetivamente degradada (%)

F - Fração de metano presente no biogás (%)

Considerou-se uma geração média de 200 toneladas semanais de resíduos de coco verde no município de Aracaju, sendo esse valor extrapolado para base anual. O resíduo de coco verde foi classificado como resíduo vegetal (garden waste), adotando-se valor de carbono orgânico degradável (DOC) igual a 17% ou 0,17, conforme recomendado pelo IPCC para esse tipo de material.

A fração de carbono efetivamente degradada (DOCf) foi considerada igual a 0,5, enquanto a fração de metano presente no biogás (F) foi adotada como 0,5. Para o fator de correção de metano (MCF), foi utilizado o valor de 1,0, considerando a disposição em aterro sanitário sob condições controladas, nas quais predominam processos anaeróbios de decomposição. A conversão do carbono degradado em metano foi realizada utilizando o fator estequiométrico de 16/12, conforme estabelecido nas diretrizes do IPCC. A partir desses parâmetros, foi estimado o potencial de geração de metano associado à disposição do resíduo, bem como avaliada a redução potencial das emissões de gases de efeito estufa em cenários alternativos de reaproveitamento do material para produção de biochar.

2.7. Avaliação ambiental do impacto do reaproveitamento dos resíduos de coco verde

Adicionalmente, foi realizada a estimativa do impacto do reaproveitamento do resíduo de coco verde na vida útil do aterro sanitário responsável pela disposição final dos resíduos sólidos urbanos da região, localizado no município de Rosário do Catete, que atende 34 municípios sergipanos, incluído a capital Aracaju (Orizon Valorização de Resíduos, 2025). Para isso, considerou-se a massa de resíduos de coco verde atualmente

destinada ao aterro e sua representatividade em relação ao total de resíduos sólidos urbanos gerados. A partir dessa relação, foi possível estimar a redução potencial da carga de resíduos destinada ao aterro em cenários de reaproveitamento do material para produção de biochar. Com base nessa redução, foi avaliado o potencial de aumento da vida útil do aterro, considerando a diminuição do volume acumulado ao longo do tempo. Inicialmente, foi determinada a fração relativa do resíduo de coco verde em relação ao total de resíduos sólidos urbanos, conforme a Equação 5:

$$\text{Fração de resíduo de coco} = \frac{\text{Massa de resíduo de coco (t ano}^{-1}\text{)}}{\text{Massa total de resíduos (t ano}^{-1}\text{)}} \quad (5)$$

Com base nessa fração, estimou-se o fator de aumento da vida útil do aterro sanitário, considerando a redução na taxa de preenchimento, conforme a Equação 6:

$$\text{Fator de aumento da vida útil} = 1 / (1 - \text{fração de resíduo de coco}) \quad (6)$$

Adicionalmente, foi realizada a projeção da massa acumulada de resíduo de coco verde que deixaria de ser destinada ao aterro ao longo de um período de 10 anos, conforme a Equação 7:

$$\text{Massa acumulada (t)} = \text{Massa de resíduo de coco (t ano}^{-1}\text{)} \times \text{tempo (anos)} \quad (7)$$

De acordo com o Relatório de Gestão da EMSURB (2024), no período de janeiro a dezembro de 2024 foram coletadas e destinadas ambientalmente 272.393,75 toneladas de resíduos sólidos urbanos no município de Aracaju. Considerando a geração anual estimada de aproximadamente 10.400 toneladas de resíduos de coco verde, esse material representa uma fração significativa do total destinado ao aterro. Essas estimativas permitiram avaliar o impacto potencial da não destinação do resíduo de coco verde sobre a vida útil do aterro sanitário, bem como a redução da carga de resíduos ao longo do tempo.

2.8. Análise estatística dos resultados

Os dados obtidos foram organizados em planilhas eletrônicas e submetidos à análise de variância (ANOVA), adotando-se delineamento inteiramente casualizado. As

médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de significância, utilizando o software SISVAR. Os gráficos foram elaborados no software SigmaPlot, com base nos valores médios e respectivos desvios padrão.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Produção e rendimento do biochar de coco verde

A produção do biochar de coco verde, realizada por meio do processo de pirólise nas condições descritas na metodologia, apresentou rendimento médio de 43,5%, calculado com base na relação entre a massa seca da biomassa e a massa final obtida após o processo. Considerando a geração anual de aproximadamente 10.400 toneladas de resíduo de coco verde no município de Aracaju (SE), e adotando um teor médio de 15% de matéria seca, haverá uma produção de 1.560 toneladas de matéria seca por ano. Com esse rendimento médio do biochar (43,5%), estima-se o potencial de produção anual de 678,6 toneladas de biochar.

Os resultados demonstram que, mesmo considerando o elevado teor de umidade do resíduo in natura, é possível obter uma quantidade expressiva de biochar a partir do reaproveitamento do coco verde. O rendimento obtido está de acordo com a literatura, que aponta a temperatura e o tempo de detenção como fatores diretamente relacionados ao rendimento do biochar durante a pirólise. De maneira geral, o aumento da temperatura intensifica a degradação térmica da biomassa, reduzindo o rendimento sólido e favorecendo a liberação de compostos voláteis.

Dissanayaka et al. (2023) observaram que o rendimento de biochar produzido a partir de resíduos de coco reduziu de aproximadamente 42,79% para 26,98% quando a temperatura de pirólise aumentou de 325 °C para 600 °C, evidenciando a influência da temperatura sobre a conversão da biomassa. Resultados semelhantes foram reportados por Noor et al. (2019), que também verificaram redução no rendimento em temperaturas entre 350 °C e 600 °C.

Além da temperatura, o tempo de detenção também influencia significativamente a produção de biochar. Tempos mais prolongados favorecem a continuidade das reações térmicas e a liberação de compostos voláteis, reduzindo a fração sólida final. Em contrapartida, menores tempos de residência tendem a preservar uma maior quantidade de material carbonizado, resultando em rendimentos mais elevados.

Embora a temperatura utilizada neste estudo (500 °C) seja considerada relativamente elevada, o tempo de detenção adotado foi de apenas 15 minutos, inferior ao observado em muitos trabalhos da literatura, que frequentemente utilizam períodos superiores a 30 ou 60 minutos. Esse menor tempo de permanência provavelmente contribuiu para o rendimento obtido de 43,5%, ao limitar a degradação completa da biomassa e preservar uma maior fração sólida.

Dessa forma, os resultados indicam que o rendimento observado não está associado apenas à temperatura de pirólise, mas à combinação entre temperatura e tempo de detenção, demonstrando que ajustes nesses parâmetros podem ser utilizados para otimizar a produção de biochar conforme o objetivo desejado.

Do ponto de vista prático, essa estimativa permite avaliar a capacidade produtiva do resíduo em escala municipal, evidenciando seu potencial como matéria-prima para aplicações agrícolas. A conversão de um resíduo urbano em um produto de valor agregado reforça a viabilidade do biochar como alternativa sustentável, contribuindo para a redução de impactos ambientais e para a inserção de práticas de economia circular.

Além disso, a produção estimada indica que o volume de biochar gerado seria suficiente para atender demandas agrícolas locais, especialmente em aplicações como tratamento de sementes, ampliando as possibilidades de substituição de insumos convencionais, como o grafite.

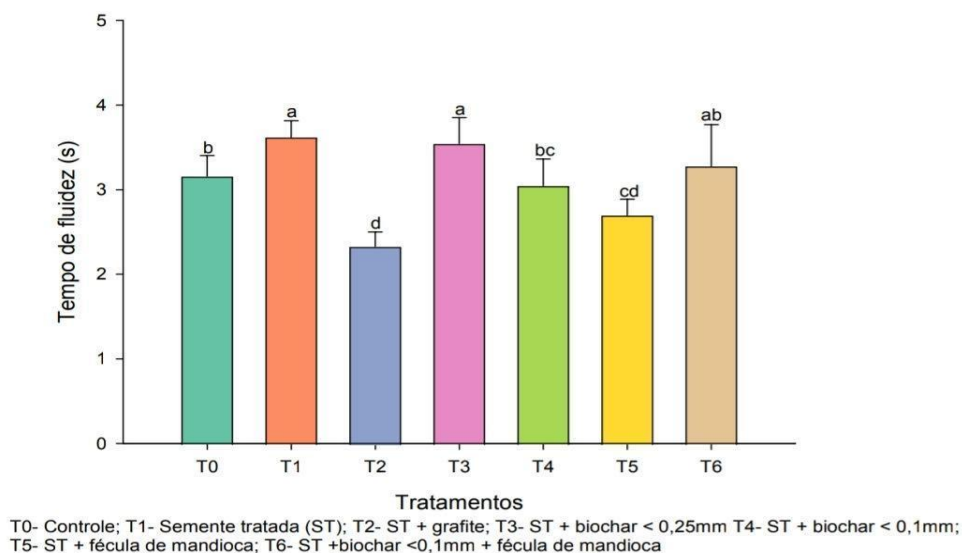
3.2 Fluidez das sementes tratadas

A fluidez das sementes é um parâmetro fundamental para o desempenho de semeadoras, estando diretamente relacionada à regularidade de distribuição e à formação de um estande adequado de plantas (Mantovani et al., 1999; Silva et al., 2009). Os resultados aqui apresentados demonstraram diferenças significativas entre os tratamentos avaliados, sendo os dados organizados em três etapas experimentais sucessivas, com ajustes progressivos nas concentrações e granulometrias dos materiais.

No primeiro ensaio, com aplicação de 1% de lubrificante seco (Figura 6), os tratamentos com grafite (T2) e fécula de mandioca (T5) apresentaram os menores tempos de escoamento de sementes, sem diferença estatística significativa entre si. Esse resultado indica que a fécula possui potencial para atuar como substituto do grafite. O desempenho da fécula de mandioca pode estar relacionado às propriedades físicas do amido, especialmente sua granulometria fina e capacidade de formação de películas superficiais sobre as sementes. Além disso, a presença de partículas finas tende a melhorar as

propriedades de fluxo de materiais particulados, favorecendo o escoamento das sementes durante a semeadura mecanizada.

Figura 6. Tempo de fluidez das sementes em função dos tratamentos com lubrificantes secos aplicados a 1% do peso das sementes



Fonte: Autor (2026)

Por outro lado, o biochar de coco verde, quando utilizado isoladamente em granulometria de 0,25 mm (T3), não apresentou melhora na fluidez em relação ao tratamento convencional (T1). Na granulometria de 0,1 mm (T4), observou-se uma redução no tempo de escoamento, porém ainda inferior ao desempenho do grafite.

A menor eficiência do biochar nas maiores granulometrias provavelmente está associada à heterogeneidade estrutural e ao formato irregular das partículas geradas durante a pirólise. Estudos recentes demonstram que biochars produzidos a partir de resíduos lignocelulósicos apresentam elevada porosidade e superfície irregular, características que podem aumentar o atrito entre partículas e dificultar o fluxo quando utilizados em maiores granulometrias (Tomczyk et al., 2020). Além disso, partículas maiores possuem maior tendência à formação de aglomerados, comprometendo a distribuição homogênea sobre as sementes.

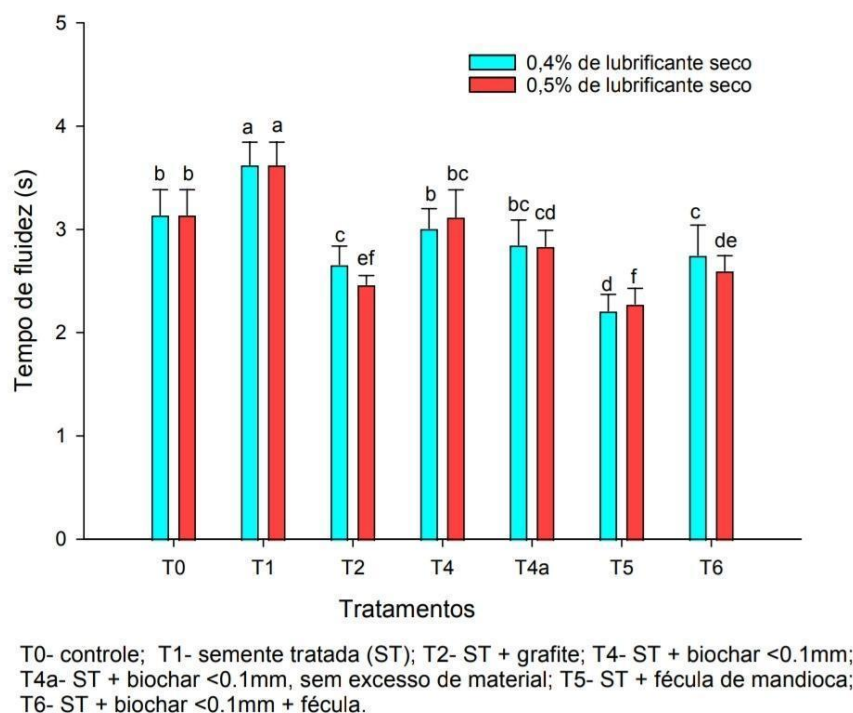
Além disso, verificou-se que o tratamento químico convencional (T1) reduziu a fluidez em comparação ao controle (T0), esse resultado está de acordo com estudos recentes sobre tratamento industrial de sementes, nos quais a aplicação de produtos fitossanitários promove aumento da rugosidade superficial e da adesividade das sementes, reduzindo sua capacidade de escoamento em sistemas mecanizados (Mota & Lima,

2025). Dessa forma, a utilização de lubrificantes secos torna-se essencial para minimizar os efeitos negativos provocados pelo revestimento químico.

Diante desses resultados, realizou-se um segundo ensaio com concentrações reduzidas (0,5% e 0,4%), visando avaliar a influência da dosagem dos produtos na fluidez (Figura 7). Observou-se que a redução da concentração não comprometeu o desempenho dos tratamentos, sendo possível manter a eficiência na melhoria da fluidez mesmo com menor quantidade de material aplicado. Os tratamentos com fécula (T5) e com a combinação biochar + fécula (T6) destacaram-se, apresentando desempenho semelhante ao do grafite.

O desempenho da formulação biochar + fécula sugere efeito complementar entre os materiais. Enquanto a fécula favorece a aderência e uniformização do revestimento, o biochar pode atuar reduzindo a umidade superficial e diminuindo a aderência excessiva causada pelo tratamento químico. Segundo Dissanayaka et al. (2023), biochars produzidos a partir de resíduos vegetais apresentam elevada área superficial e capacidade de adsorção, propriedades que podem contribuir para melhorias físicas em sistemas particulados.

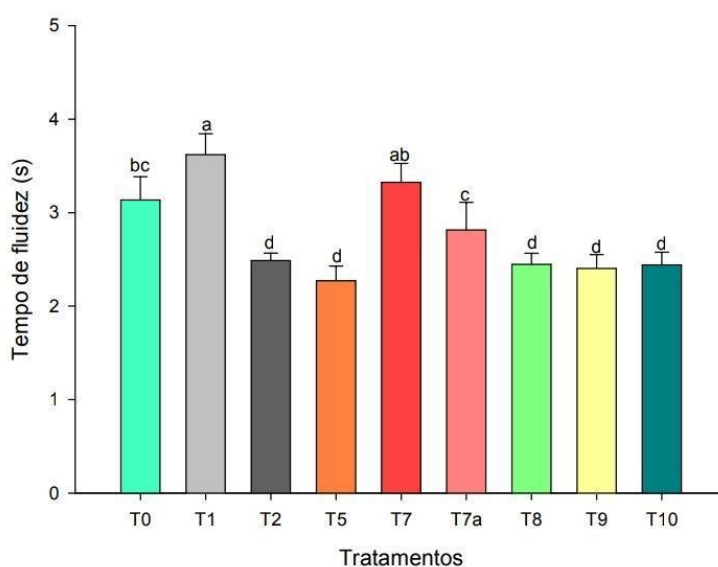
Figura 7. Tempo de fluidez das sementes em função dos tratamentos com lubrificantes secos aplicados 0,5% e 0,4% do peso das sementes.



No terceiro ensaio (Figura 8), com concentração fixada em 0,5%, foi avaliado o efeito da redução da granulometria do biochar para 53 μm . Nessa condição, o biochar isolado (T7) apresentou melhora em relação às granulometrias anteriores, embora ainda com desempenho inferior à grafite. A remoção do excesso superficial (T7a) promoveu leve melhora na fluidez, indicando que o excesso de material pode prejudicar o escoamento.

A melhora observada após a redução da granulometria para 53 μm evidencia a influência direta do tamanho das partículas sobre a fluidez das sementes. Partículas menores tendem a promover revestimento mais uniforme e menor atrito entre sementes, favorecendo o escoamento. Resultados semelhantes foram observados por Zhang et al. (2023), a eficiência do recobrimento com biochar no aprimoramento das propriedades físicas e no estabelecimento de sementes.

Figura 8. Tempo de fluidez das sementes em função dos tratamentos com lubrificantes secos aplicados a 0,5% do peso das sementes.



T0- controle; T1- semente tratada (ST); T2- ST + grafite; T5- ST + fécula de mandioca; T7- ST + biochar <53 μm ; T7a- ST + biochar <53 μm , sem excesso de material T8- ST + biochar <53 μm + grafite; T9- ST + biochar <53 μm + fécula; T10- ST + fécula + grafite.

Fonte: Autor (2026)

As formulações combinadas apresentaram resultados mais expressivos. Os tratamentos T8 (biochar + grafite), T9 (biochar + fécula) e T10 (fécula + grafite) apresentaram desempenho semelhante ao tratamento com grafite puro (T2), sem diferença estatística significativa. Os resultados demonstram que as formulações híbridas foram capazes de compensar limitações individuais de cada componente. No tratamento T9, por exemplo, a fécula provavelmente atuou promovendo melhor aderência e

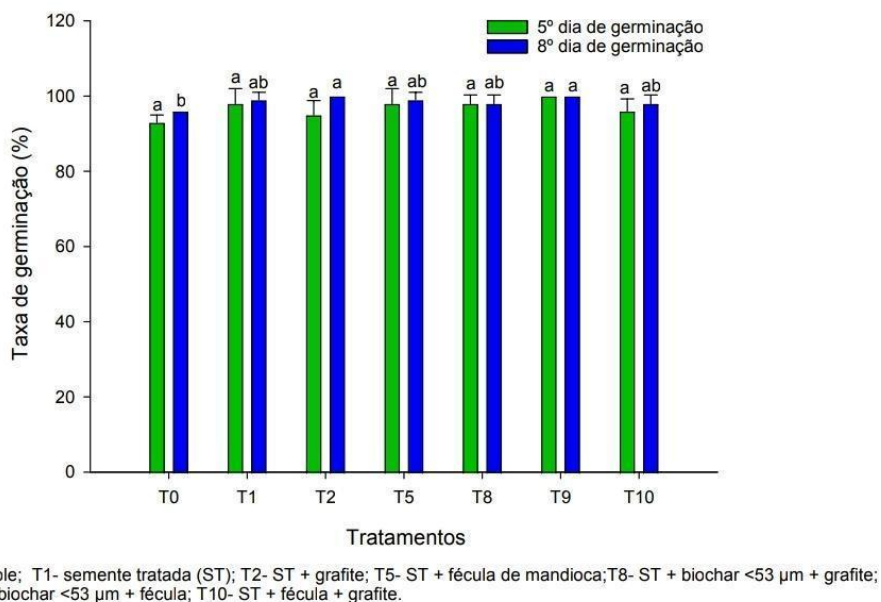
distribuição do biochar sobre as sementes, enquanto o biochar contribuiu para redução parcial do atrito superficial. Esses resultados reforçam o potencial de formulações sustentáveis à base de resíduos agroindustriais como alternativas viáveis à grafite convencional, reduzindo custos e impactos ambientais sem comprometer o desempenho operacional da semeadura.

Estudos futuros que avaliem o efeito de nanopartículas de biochar como substituto do grafite são necessários uma vez que a granulometria do material pode limitar a sua utilização eficiente no tratamento de sementes.

3.3 Teste de germinação das sementes

A avaliação da germinação das sementes de feijão-fradinho foi realizada com o objetivo de verificar possíveis efeitos dos lubrificantes secos sobre o desenvolvimento inicial das plantas. As contagens foram realizadas no 5º e 8º dia após a instalação do experimento (Figura 9).

Figura 9. Taxa de germinação das sementes de feijão-fradinho no 5º e 8º, em função dos tratamentos com diferentes lubrificantes secos.



Fonte: Autor (2026)

De modo geral, os resultados indicaram que nenhum dos tratamentos comprometeu a capacidade germinativa das sementes, não sendo observadas diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos. Esse resultado demonstra que as

formulações testadas são seguras para aplicação no tratamento de sementes, não interferindo negativamente no processo de germinação.

Apesar da ausência de diferença estatística, destaca-se que o tratamento T9 (biochar + fécula) atingiu 100% de germinação já no 5º dia, antecipando o desempenho dos demais tratamentos, que alcançaram esse valor apenas no 8º dia. Esse comportamento sugere um possível efeito positivo da combinação entre biochar e fécula.

Esse resultado pode estar relacionado à capacidade de retenção de água do biochar associada à formação de uma matriz aderente promovida pela fécula, favorecendo a manutenção de um microambiente úmido ao redor da semente. Essa condição pode facilitar o processo de embebição, etapa inicial da germinação, contribuindo para a antecipação do desenvolvimento das plântulas.

Resultados semelhantes foram observados por Zhang et al. (2023), que avaliaram o uso de biochar como material de revestimento de sementes de arroz. Os autores verificaram que concentrações adequadas de biochar promoveram aumento na taxa e no índice de emergência, além de favorecer o crescimento inicial das plântulas. Segundo os autores, esses efeitos estão associados à maior absorção de água pelas sementes e ao estímulo de processos metabólicos envolvidos na germinação.

No presente estudo, os resultados observados para o tratamento T9 corroboram as evidências apresentadas por Zhang et al. (2023), sugerindo que formulações contendo biochar podem favorecer o processo germinativo. Entretanto, deve-se considerar que a formulação utilizada continha também fécula de mandioca, o que dificulta atribuir esse comportamento exclusivamente à presença do biochar. Assim, os resultados indicam um possível efeito complementar entre os componentes da formulação, aspecto que merece ser investigado em estudos futuros.

3.4 Capacidade de retenção de água do biochar

A capacidade de retenção de água (CRA) do biochar de coco verde foi avaliada como forma de investigar possíveis benefícios adicionais do material além da melhoria da fluidez das sementes. O valor médio obtido foi de 5,2 mL g⁻¹, indicando elevada capacidade de retenção hídrica, característica frequentemente associada à estrutura porosa desenvolvida durante o processo de pirólise.

Resultados semelhantes foram relatados por Santos et al. (2022), que avaliaram biochars produzidos a partir de diferentes resíduos orgânicos, incluindo casca de coco verde. Os autores verificaram que o biochar de coco verde apresentou elevada capacidade

de retenção de água quando comparado a outros materiais avaliados, evidenciando seu potencial para aplicações agrícolas relacionadas ao manejo hídrico. Segundo os autores, essa característica está associada à presença de poros e à elevada área superficial do material, que favorecem a adsorção e o armazenamento de água.

Além das características estruturais, Santos et al. (2022) destacam que fatores como a conectividade dos poros, a hidrofobicidade superficial e as condições de produção do biochar podem influenciar diretamente sua capacidade de retenção hídrica. Dessa forma, materiais produzidos a partir de diferentes biomassas ou submetidos a distintas condições de pirólise podem apresentar comportamentos distintos quanto ao armazenamento de água. Mesmo sendo produzido em temperatura ligeiramente inferior (500 °C) à utilizada por Santos et al. (2022), o biochar obtido neste estudo apresentou comportamento compatível com o observado pelos autores, reforçando o potencial do resíduo de coco verde para aplicações relacionadas à retenção hídrica.

Considerando a aplicação de 0,5% de lubrificante seco sobre o peso das sementes, tem-se que, para uma tonelada de sementes, são utilizados aproximadamente 5 kg de lubrificante. Nos tratamentos contendo biochar em proporção de 50%, isso corresponde a cerca de 2,5 kg de biochar por tonelada de sementes tratadas. Com base na capacidade de retenção de água obtida, estima-se que essa quantidade de biochar seja capaz de reter aproximadamente 13 litros de água por tonelada de sementes.

Embora esse volume seja relativamente baixo em termos absolutos, sua distribuição sobre um grande número de sementes evidencia que o biochar pode agregar uma funcionalidade adicional às formulações de lubrificantes secos. Diferentemente da grafite, cuja função está restrita à melhoria da fluidez, o biochar apresenta propriedades físicas capazes de contribuir para a retenção de água, ampliando seu potencial de aplicação em sistemas agrícolas. Essa característica reforça o potencial do material como alternativa sustentável para o tratamento de sementes, agregando benefícios que vão além da simples lubrificação.

3.5 Análise econômica dos lubrificantes secos

A análise de custos demonstrou diferenças expressivas entre as formulações avaliadas. O grafite apresentou o maior custo por quilograma, enquanto a fécula de mandioca representou a alternativa mais econômica. As formulações híbridas apresentaram custos intermediários, com destaque para a combinação biochar + fécula, que apresentou redução significativa em relação ao uso exclusivo de grafite.

Considerando uma taxa de aplicação de 0,5% e uma densidade de semeadura de 70 kg ha⁻¹, o consumo de lubrificante seco é de aproximadamente 0,35 kg ha⁻¹. Com base nesses valores, estimou-se o custo por hectare, evidenciando que a formulação biochar + fécula pode reduzir os custos em cerca de 70% em relação ao grafite.

Em uma área de 1000 hectares, essa redução representa uma economia superior a R\$ 12.000 por safra, demonstrando o potencial da tecnologia para redução de custos em sistemas produtivos de médio e grande porte.

Tabela 3: Tabela de custos por kg de diferentes formulações de lubrificantes secos.

Formulação	Proporção dos componentes	Custo por kg (R\$)
Grafite	100%	50,00
Fécula	100%	4,99
Biochar + fécula	50% + 50%	14,99
Biochar + grafite	50% + 50%	37,50

Fonte: Autor (2026)

3.6 Projeção de impacto econômico em escala nacional

A partir da economia estimada por hectare, é possível projetar o impacto econômico da substituição do grafite em escala nacional. Considerando uma economia média de aproximadamente R\$ 12,25 por hectare e uma área cultivada de cerca de 45,7 milhões de hectares de soja no Brasil (CONAB, 2024), a economia potencial pode atingir valores expressivos.

Nesse cenário, a adoção ampla da formulação à base de biochar e fécula podem resultar em uma economia potencial de R\$ 560 milhões por safra, dependendo das variações nos preços dos insumos e das condições regionais de produção.

Embora a substituição total do grafite em nível nacional seja improvável no curto prazo, esses resultados evidenciam que mesmo uma adoção parcial da tecnologia pode gerar impactos econômicos significativos no setor agrícola. Além disso, a utilização de

resíduos agroindustriais como matéria-prima reforça o caráter sustentável da proposta, alinhando ganhos econômicos à redução de impactos ambientais.

3.7 Estimativa de emissões de metano evitadas pelo reaproveitamento do resíduo de coco verde ou / Estimativa de emissões potenciais de metano evitadas

A estimativa das emissões de metano associadas à disposição de resíduos de coco verde em aterro sanitário foi realizada com base na metodologia proposta pelo IPCC, utilizando o modelo simplificado (Tier 1). Com base nos valores adotados, estimou-se que o resíduo gerado em um único ano apresenta potencial de formação de aproximadamente 520 toneladas de CH₄ ao longo de seu processo de decomposição em condições anaeróbias.

Cabe destacar que essa emissão ocorre de forma gradual ao longo do tempo, podendo se estender por décadas, conforme a dinâmica de degradação da matéria orgânica em aterros sanitários. Dessa forma, a não destinação desse resíduo ao aterro implica na mitigação desse volume total de metano ao longo de sua decomposição. Considerando o potencial de aquecimento global do metano equivalente a 28 vezes o dióxido de carbono, esse valor corresponde a aproximadamente 14.500 toneladas de CO₂ equivalente.

Em um cenário de manutenção dessa taxa de geração ao longo de 10 anos, o potencial de mitigação pode ultrapassar 5.000 toneladas de metano, reforçando a relevância ambiental do reaproveitamento desse resíduo por meio da produção de biochar.

3.8 Impacto na vida útil do aterro sanitário e economia associada

Com base nos dados de geração de resíduos sólidos urbanos do município de Aracaju, estimados em aproximadamente 272.393,75 toneladas por ano, e considerando a geração anual de cerca de 10.400 toneladas de resíduo de coco verde, verificou-se que esse material representa aproximadamente 3,8% do total de resíduos destinados ao aterro sanitário.

A retirada desse resíduo do fluxo de disposição final resulta em uma redução direta na taxa de preenchimento do aterro, proporcionando um aumento estimado de aproximadamente 3,8% em sua vida útil, considerando condições constantes de geração e disposição de resíduos ao longo do tempo.

Em um horizonte de 10 anos, a não destinação do resíduo de coco verde ao aterro corresponde à retirada acumulada de aproximadamente 104.000 toneladas de resíduos. Esse volume evidencia o potencial da estratégia em reduzir significativamente a pressão

sobre a infraestrutura de disposição final, contribuindo para a ampliação da vida útil do aterro sanitário.

Além dos benefícios operacionais, a redução do volume de resíduos destinados ao aterro implica em economia direta para o poder público. Considerando custos anuais estimados entre R\$ 900 mil e R\$ 1 milhão associados à coleta, transporte e disposição desse resíduo, a adoção dessa estratégia pode resultar em uma economia acumulada da ordem de R\$ 9 a 10 milhões ao longo de 10 anos.

Dessa forma, os resultados demonstram que o reaproveitamento do resíduo de coco verde, por meio da produção de biochar, apresenta impacto positivo não apenas do ponto de vista ambiental, mas também operacional e econômico, contribuindo para a sustentabilidade da gestão de resíduos sólidos urbanos.

3.9 Contribuição do estudo para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)

Os resultados obtidos neste estudo evidenciam que a utilização de biochar de resíduo de coco verde, isoladamente ou em combinação com fécula de mandioca, como lubrificante seco no tratamento de sementes, apresenta contribuição direta para diversos ODS estabelecidos pela ONU. No âmbito da ODS 2 (Fome Zero e Agricultura Sustentável), os resultados demonstraram que as formulações contendo biochar e fécula de mandioca foram capazes de manter a qualidade fisiológica das sementes, não comprometendo a germinação e, em alguns casos, promovendo antecipação do processo germinativo. Além disso, a melhoria na fluidez das sementes contribui para maior uniformidade na semeadura, favorecendo o estabelecimento adequado da lavoura e o potencial produtivo das culturas.

Em relação à ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis), destaca-se o reaproveitamento de resíduos agroindustriais, como os resíduos de coco verde, que normalmente são destinados a aterros sanitários ou descartados de forma inadequada. A conversão desse resíduo em biochar representa uma estratégia de valorização de um passivo ambiental, promovendo sua reinserção na cadeia produtiva e reduzindo a dependência de insumos de origem mineral, como o grafite.

No contexto da ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima), a substituição parcial ou total do grafite por biochar contribui para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa. As estimativas realizadas indicam que o desvio de aproximadamente 200 toneladas semanais de resíduos de coco verde do aterro sanitário evita a geração de

metano ao longo do processo de decomposição anaeróbia, reduzindo significativamente o impacto climático associado à destinação desse material.

Adicionalmente, o estudo contribui para a ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis), ao propor uma alternativa que reduz o volume de resíduos encaminhados aos aterros sanitários, promovendo o aumento da vida útil dessas estruturas e a diminuição dos custos associados à gestão de resíduos sólidos urbanos. Esse aspecto é particularmente relevante no contexto do município de Aracaju, onde a elevada geração de resíduos de coco verde representa um desafio para o sistema de manejo de resíduos.

No que se refere à ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura), o desenvolvimento de formulações alternativas de lubrificantes secos, baseadas em materiais de baixo custo e ampla disponibilidade regional, evidencia o potencial de inovação tecnológica aplicada ao setor agrícola. A utilização de biochar e fécula de mandioca demonstra viabilidade técnica e econômica, podendo ser adaptada e escalada para diferentes sistemas produtivos.

Por fim, a ODS 15 (Vida Terrestre) também é contemplada, uma vez que a redução da extração de grafite contribui para a diminuição dos impactos ambientais associados à mineração, incluindo a degradação do solo e a perda de biodiversidade. Dessa forma, a substituição por materiais de origem renovável e reaproveitados reforça a adoção de práticas mais sustentáveis no uso dos recursos naturais.

Dessa maneira, os resultados deste estudo demonstram que a utilização do biochar de coco verde como lubrificante seco no tratamento de sementes não se limita a uma alternativa técnica ao grafite, mas se configura como uma estratégia integrada que promove benefícios agronômicos, ambientais e econômicos, alinhando-se de forma consistente aos princípios do desenvolvimento sustentável.

4 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos demonstram que o lubrificante seco à base de biochar de resíduo de coco verde e fécula de mandioca constitui uma alternativa tecnicamente viável ao grafite no tratamento de sementes. As formulações desenvolvidas apresentaram desempenho compatível com o lubrificante comercial, evidenciando que a substituição parcial ou total do grafite por materiais renováveis é uma estratégia promissora para a semeadura mecanizada.

Além da eficiência como lubrificante, a formulação contendo biochar e fécula de mandioca apresentou características que podem favorecer o desempenho fisiológico das

sementes, sem comprometer sua germinação. Esses resultados demonstram que o aproveitamento do biochar pode agregar funções além da redução do atrito durante a semeadura, ampliando seu potencial de aplicação.

Sob o ponto de vista econômico, a tecnologia proposta apresentou potencial para reduzir significativamente os custos com lubrificantes utilizados no tratamento de sementes, ao mesmo tempo em que promove a valorização de um resíduo agroindustrial abundante. Do ponto de vista ambiental, a utilização do biochar contribui para o aproveitamento do resíduo de coco verde, reduz a dependência de um recurso mineral não renovável e favorece práticas alinhadas aos princípios da economia circular.

Dessa forma, conclui-se que o lubrificante seco desenvolvido reúne vantagens agronômicas, econômicas e ambientais, configurando-se como uma alternativa sustentável ao grafite comercial no tratamento de sementes. A tecnologia apresenta potencial de aplicação prática e contribui para a valorização de resíduos agroindustriais, transformando um passivo ambiental em um insumo de maior valor agregado.

Por fim, recomenda-se a realização de estudos em condições de campo para validar o desempenho das formulações em diferentes culturas e sistemas de produção, bem como avaliar seus efeitos sobre a emergência, o desenvolvimento inicial e a produtividade das plantas.

5 REFERÊNCIAS

ARACAJU. Empresa Municipal de Serviços Urbanos (EMSURB). Diretoria de Operações. *Prefeitura apresenta estudo sobre coleta e destino do resíduo do coco em Aracaju*. **Aracaju: Secretaria Municipal de Comunicação Social, 2019**. Disponível em: <https://www.aracaju.se.gov.br/noticias/84071/>. Acesso em: 23 jun. 2026.

ARACAJU. Empresa Municipal de Serviços Urbanos (EMSURB). *Relatório de Gestão 2024*. **Aracaju: EMSURB, 2024**. Disponível em: https://transparencia.aracaju.se.gov.br/wp-content/uploads/sites/8/2024/12/RELATORIO_DE_GESTAO_Consolidado.pdf. Acesso em: 10 ago. 2026.

ARACAJU. Empresa Municipal de Serviços Urbanos (EMSURB). *Relatório de Gestão de Resíduos Sólidos do Município de Aracaju: diagnóstico de passivos ambientais e resíduos verdes urbanos*. **Aracaju: EMSURB, 2025**. Disponível em: <http://www.aracaju.se.gov.br/emsub/>. Acesso em: 22 jun. 2026.

BANU, A. P.; SUJATHA, K.; GEETHA, R.; KANNAN, P. Biochar coating and its effect on seed quality and biochemical parameters in black gram (*Vigna mungo* L.) var. VBN 11. *The Pharma Innovation Journal*, v. 11, p. 2836–2840, 2022. Acesso em: 20 abr. 2026.

BHADHA, J. H. et al. *Aumentando o teor de matéria orgânica do solo para melhorar a capacidade de retenção de água*. Gainesville: **Departamento de Ciências do Solo e da Água, UF/IFAS Extension**, 2017. (SL447). Disponível em: <https://edis.ifas.ufl.edu/publication/SS661>. Acesso em: 5 ago. 2025.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. *Regras para análise de sementes*. **Brasília: MAPA/ACS**, 2009. 399 p. Acesso em: 10 jun. 2025.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). *Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos*. Safra 2023/24, v. 11, n. 12. Brasília, DF: CONAB, 2024.

DISSANAYAKA, D. M. S. H. et al. Production and characterization of biochar from coconut biomass under different pyrolysis temperatures. *Biomass*, v. 5, n. 4, art. 78, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/biomass5040078>. Acesso em: 12 abr. 2026.

FERREIRA, M. C. A. et al. Avaliação e modelagem da secagem natural de resíduos de coco verde visando o aproveitamento energético. In: **SIMPÓSIO DE INTEGRAÇÃO ACADÊMICA**, 2025, Viçosa. Viçosa: UFV, 2025. Disponível em: <https://www3.dti.ufv.br/sia/vicoso/2025/trabalhos/22332>. Acesso em: 12 jun. 2026.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). *How to Feed the World in 2050*. **Rome: FAO**, 2009. Disponível em: https://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/expert_paper/How_to_Feed_the_World_in_2050.pdf. Acesso em: 23 jun. 2026.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Censo Demográfico 2022: população e domicílios – primeiros resultados*. **Rio de Janeiro: IBGE**, 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/>. Acesso em: 23 jun. 2026.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Produção Agrícola Municipal 2024: culturas temporárias e permanentes*. **Rio de Janeiro: IBGE**, 2025. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/>. Acesso em: 23 jun. 2026.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Produção brasileira de mandioca em 2023*. **Salvador: Embrapa Mandioca e Fruticultura**, 2023. Disponível em: https://www.cnpmf.embrapa.br/Base_de_Dados/index_pdf/dados/brasil/mandioca/b1_mandioca.pdf. Acesso em: 10 maio 2025.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Volume 5: Waste. Chapter 3: Solid Waste Disposal. **Hayama: Institute for Global Environmental Strategies (IGES)**, 2006. Disponível em: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol5.html>. Acesso em: 22 jun. 2026.

KALANTARI, D. Evaluating grain flow from different discharge gates of a grain seeder. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, v. 9, n. 2, p. 141–146, 2016. Acesso em: 10 maio 2026.

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. (Ed.). *Biochar for environmental management: science, technology and implementation*. 2. ed. London: Routledge, 2015. 944 p. Acesso em: 17 mar. 2026.

MANTOVANI, E. C.; MANTOVANI, B. H. M.; CRUZ, L.; MEWES, W. L. C.; OLIVEIRA, A. C. Desempenho de dois sistemas distribuidores de sementes utilizados em semeadoras de milho. *Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília*, v. 34, n. 1, p. 93–98, jan. 1999. Acesso em: 2 abr. 2026.

MOTA, M. C.; DE LIMA, O. N. Effect of seeding speed and graphite lubricant on soybean plantability. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 29, n. 3, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v29n3e281566>. Acesso em: 15 jun. 2026.

NOOR, N. M. et al. Effect of pyrolysis temperature on biochar produced from coconut fiber biomass. *Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences*, v. 15, n. 5, p. 694–698, 2019. Disponível em: <https://mjfas.utm.my/index.php/mjfas/article/view/1015/pdf>. Acesso em: 13 ago. 2026.

ONU – Organização das Nações Unidas. *Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável*. 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 5 ago. 2025.

ORIZON VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS. Na região do Vale do Cotinguiba, a 40 km de Aracaju, está a nossa unidade de Rosário do Catete, em Sergipe. *LinkedIn*, 9 out. 2025. Disponível em: https://pt.linkedin.com/posts/orizonvr_orizon-pelo-brasil-ros%C3%A1rio-do-catete-activity-7392653171254456320-OorW. Acesso em: 15 jun. 2026.

ROGOVSKA, N. et al. Germination tests for assessing biochar quality. *Journal of Environmental Quality*, v. 41, n. 4, p. 1014–1022, 2012. DOI: 10.2134/jeq2011.0103.

SANTOS, J. A.; GONZAGA, M. I. S.; SANTOS, J. C. J. et al. Characterization and water retention capacity of biochar produced from different organic wastes. *Research, Society and Development*, v. 11, n. 5, e48411528360, 2022. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i5.28360>. Acesso em: 26 jun. 2025.

SANTOS, V. M. et al. Soybean seed chemical treatment associated with inoculants: physiological and agronomical analyses. *Plant Physiology Reports*, v. 26, n. 2, p. 247–255, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40502-021-00577-1>. Acesso em: 10 jun. 2026.

SAVI, D.; JASPER, S. P.; ZIMMERMANN, G. G.; KMIECIK, L. L.; STRAPASSON NETO, L.; SOBENKO, L. R. Graphite action on the longitudinal distribution of soybean seeds in mechanical and pneumatic feeders. *Acta Scientiarum. Agronomy, Maringá*, v. 45, e57920, 2023. DOI: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v45i1.57920>. Acesso em: 21 abr. 2026.

SAVI, D.; KMIECIK, L. L.; STRAPASSON NETO, L.; SILVA, T. X. D.; JASPER, S. P. Influence of seed tube curvature on seed longitudinal distribution. *Engenharia*

Agrícola, v. 40, n. 6, p. 732–739, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v40n6p732-739/2020>. Acesso em: 25 abr. 2026.

SILVA, F. D. L.; BALARDI, R. S.; DEBONA, D.; CORTE, G. D.; TORMEN, N. R.; DOMINGUES, L. S. Efeito fisiológico do tratamento de sementes de soja com fungicidas e inseticidas. In: **XVIII CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DE PELOTAS**, 2009. Acesso em: 12 mar. 2026.

TOMCZYK, A.; SOKOŁOWSKA, Z.; BOGUTA, P. Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, v. 19, n. 1, p. 191–215, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11157-020-09523-3>.

WU, Q.; FAN, C.; WANG, H.; HAN, Y.; TAI, F.; WU, J.; LI, H.; HE, R. Biphasic impacts of graphite-derived engineering carbon-based nanomaterials on plant performance: Effectiveness vs. Nanotoxicity. *Advanced Agrochem*, v. 2, n. 2, p. 113–126, 2023. Acesso em: 2 abr. 2026.

ZHANG, K. et al. Biochar Coating as a Cost-Effective Delivery Approach to Promoting Seed Quality, Rice Germination, and Seedling Establishment. *Plants*, v. 12, n. 22, art. 3896, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants12223896>. Acesso em: 25 abr. 2026.

ZHANG, K.; KHAN, Z.; YU, Q.; QU, Z.; LIU, J.; LUO, T.; ZHU, K.; BI, J.; HU, L.; LUO, L. Biochar Coating Is a Sustainable and Economical Approach to Promote Seed Coating Technology, Seed Germination, Plant Performance, and Soil Health. *Plants*, v. 11, art. 2864, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants11212864>. Acesso em: 27 abr. 2026.