

UFRRJ
INSTITUTO DE FLORESTAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS
AMBIENTAIS E FLORESTAIS

TESE

**Resíduos petrolíferos e orgânicos urbanos aliados a
Restauração Florestal**

Victória Maria Monteiro Mendonça

2023



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS
E FLORESTAIS

RESÍDUOS PETROLÍFEROS E ORGÂNICOS URBANOS ALIADOS
A RESTAURAÇÃO FLORESTAL

VICTÓRIA MARIA MONTEIRO MENDONÇA

Sob a Orientação do Professor
Marcos Gervasio Pereira

Coorientação do Professor
José Carlos Arthur Júnior

e Coorientação do Doutor
Júlio César Ribeiro

Tese Submetida como requisito para
obtenção do grau de **Doutora em Ciências**
Ambientais e Florestais, no Curso de Pós-
Graduação em Ciências Ambientais e
Florestais, Área de Concentração em
Silvicultura e Manejo Florestal.

Seropédica, RJ
Março de 2023

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Biblioteca Central / Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M539r Monteiro Mendonça, Victória Maria , 1991-
Resíduos petrolíferos e orgânicos urbanos aliados a
Restauração Florestal / Victória Maria Monteiro
Mendonça. - Seropédica, 2023.
92 f.

Orientador: Marcos Gervasio Pereira.
Coorientador: José Carlos Arthur Junior.
Coorientador: Júlio César ribeiro.
Tese(Doutorado). -- Universidade Federal Rural do
Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Ciências
Ambientais e Florestais/Engenharia Florestal, 2023.

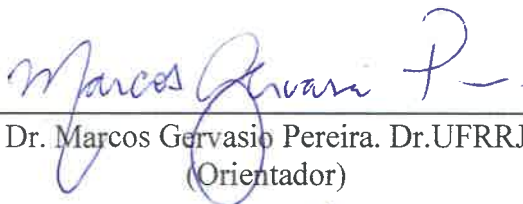
1. Reciclagem. 2. Produção de espécies nativas. 3.
Formulação de substratos. 4. Composto orgânico. 5.
Casca de perfuração offshore e onshore. I.
Gervasio Pereira, Marcos, 1965-, orient. II. Arthur
Junior, José Carlos, -, coorient. III. César ribeiro,
Júlio, -, coorient. IV Universidade Federal Rural do
Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Ciências
Ambientais e Florestais/Engenharia Florestal. V.
Título.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS E FLORESTAIS

VICTÓRIA MARIA MONTEIRO MENDONÇA

Tese submetida como requisito parcial para obtenção do grau de Doutora em Ciências Ambientais e Florestais, no Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais, Área de Concentração em Silvicultura e Manejo Florestal.

TESE APROVADA EM 31/03/2023.



Dr. Marcos Gervasio Pereira. Dr.UFRRJ
(Orientador)



Dr. Everaldo Zonta. UFRRJ



Dr. Fábio Cardoso de Freitas. Dr. UFRRJ



Dr. Alan Henrique Marques de Abreu. Dr. CEDAE



Dr. Dione Richer Momolli. Dr. UFSM



TERMO Nº 491/2023 - PPGCAF (12.28.01.00.00.00.27)

(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

(Assinado digitalmente em 08/05/2023 09:48)

EVERALDO ZONTA
DIRETOR DE INSTITUTO
IA (12.28.01.21)
Matrícula: ###130#5

(Assinado digitalmente em 08/05/2023 11:15)

FABIO CARDOSO DE FREITAS
COORDENADOR CURS/POS-GRADUACAO
CoordCGGA (12.28.01.00.00.00.15)
Matrícula: ###387#5

(Assinado digitalmente em 08/05/2023 08:46)

MARCOS GERVASIO PEREIRA
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DeptS (12.28.01.00.00.00.33)
Matrícula: ###607#1

(Assinado digitalmente em 08/05/2023 08:48)

DIONE RICHER MOMOLLI
ASSINANTE EXTERNO
CPF: ###.###.840-##

(Assinado digitalmente em 10/06/2024 15:37)

ALAN HENRIQUE MARQUES DE ABREU
ASSINANTE EXTERNO
CPF: ###.###.836-##

Visualize o documento original em <https://sipac.ufrrj.br/documentos/> informando seu número: **491**, ano: **2023**, tipo: **TERMO**, data de emissão: **08/05/2023** e o código de verificação: **918f284445**

Dedico esse estudo à minha mãe Sueli da
Silva Monteiro, ao meu pai Tanagér Joaquim
Mendonça (*in memorian*) e aos meus sonhos.

Dedico.



AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me dado força, resistência, resiliência e sabedoria nos desafios da vida, além de proteção e saúde após uma pandemia, para conclusão desse trabalho.

Muitas pessoas tornaram essa jornada mais fácil e gostaria de agradecer-las por isso.

A minha mãe, Sueli, por me apoiar em tudo, ser meu exemplo de luta, força, dedicação e meu amor.

Ao meu companheiro, José Henrique, pela cumplicidade nessa jornada, pelo amor, apoio essencial nos momentos felizes e difíceis, e por todo aprendizado e crescimento ao longo desses anos. Eu te amo.

Às minhas irmãs Emmanuelli e Vanessa, ao meu sobrinho Rafael e ao meu cunhado Mizinho, por todo o suporte, incentivo e compreensão dos momentos que estive ausente.

Ao meu pai, Tanagér (*in memoriam*), falecido no período de realização dessa pesquisa, pela oportunidade da despedida e pelos novos irmãos.

Aos meus mais novos irmãos Victor, Bárbara Vitória e Ana Beatriz, pelo carinho, recepção e compreensão dos momentos que estive ausente.

Aos meus sogros Déborah e Caíco, minha cunhada Teté e ao meu sobrinho Arthur, por todo cuidado, suporte e amor.

A Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ) por mais esse título, experiência inigualável, pela oportunidade de estudo e toda estrutura oferecida nesses 12 anos de formação acadêmica.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Aos Programas de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais (PPGCAF) e Programa de Pós-Graduação em Agronomia - Ciência do Solo (PPGA-CS).

À Petrobras pelo fornecimento dos resíduos e pela concessão da bolsa para realização do presente estudo.

Ao meu orientador sempre presente, Marcos Gervasio Pereira, amigo e mestre de todos os momentos, pela orientação, paciência, dedicação e por nunca desistir de mim ao longo desses 11 anos de trabalho juntos.

Aos meus coorientadores Júlio César Ribeiro e Professor José Carlos Arthur Júnior, pela atenção, confiança, ensinamentos e auxílio na execução da pesquisa.

Ao Professor Everaldo Zonta, pelo acolhimento na equipe, ensinamentos, paciência, confiança e amizade.

Ao Laboratório de Gênese e Classificação de solos (LGCS) e a toda a sua equipe, por ser minha segunda casa nos últimos 11 anos, por me proporcionar estrutura durante todos os trabalhos, além das risadas e amizades. Em especial ao meu pai da vida Gilsonley, por toda a parceria, paciência louvável, suporte técnico e psicológico, dedicação e amizade, você é um dos grandes responsáveis por eu ter chegado até aqui.

Ao Laboratório de Estudos das Relações Solo-Planta (LSP) e a toda a sua equipe, por me receberem, pelo convívio, ajuda nos experimentos, pela estrutura durante esse trabalho, amizades, pelos churrascos, gargalhadas e conversas. Em especial a Marinete, Rafael Motta, Thainá, Juliana, Yan, Maura, Jander, Raphael, Petrus, Thiago, Andressa, Thaís, Arthur, Melissa, Andreia, Guilherme, Ana Carolina e Giovanni.

Ao Professor Deivid Lopes Machado, pelas valiosas contribuições, correções, apoio, disponibilidade e fornecimento das sementes.

Ao Sebastião (Tião) e Lucas, funcionários do viveiro do Instituto de Florestas, por todo suporte técnico, pelo auxílio no cuidado das mudas no viveiro, principalmente no período de pandemia.

Aos meus amigos ruralinos e companheiros de pós-graduação Marcondes, Poliane, Danilo, Anne, Wayka e meu super Cadu, seguimos fortes e rindo.

Ao meu filhote de quatro patas, Saga, que está comigo em mais uma titulação e toda a vida acadêmica.

À banca examinadora da Tese, Alan Henrique M. de Abreu, Everaldo Zonta, Dione Richer Momolli e Fábio Cardoso de Freitas por aceitarem avaliar e contribuir com o presente trabalho.

A todos os demais professores que tive pela vida que muito contribuíram para minha educação e formação.

E a todos que por falha da memória não foram citados, que contribuíram para minha formação pessoal e acadêmica, bem como no desenvolvimento desse estudo.

Muito obrigada!



Victória Maria Monteiro Mendonça

“Nada se cria, nada se perde, tudo se transforma.”
Lavoisier, 1760.

RESUMO GERAL

MENDONÇA, Victória Maria Monteiro. **Resíduos petrolíferos e orgânicos urbanos aliados a restauração florestal**. 2023. 93p. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais e Florestais, Silvicultura). Instituto de Florestas, Departamento de Silvicultura, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2023.

Os resíduos sólidos são um problema crescente em nosso mundo cada vez mais consumista e descartável, que necessita de adequação à legislação e adoção de práticas mais adequadas e limpas para minimizar seus impactos e proteger o meio ambiente. Diariamente, toneladas de resíduos são produzidas e muitas vezes descartadas de forma inadequada, afetando a qualidade de vida da população e degradando ecossistemas vitais. No entanto, essa problemática pode ser transformada em uma oportunidade de reaproveitamento e geração de renda, através da reciclagem, transformando os resíduos sólidos em matéria-prima para novos produtos, colaborando com a sua redução. O reaproveitamento dos resíduos sólidos na formulação de substratos para produção de mudas florestais, pode favorecer a retenção hídrica, disponibilidade de macro e micronutrientes e reduzir custos com insumos florestais. Essa pesquisa tem por objetivo caracterizar e avaliar o potencial dos resíduos sólidos urbanos orgânicos e resíduos industriais petrolíferos, visando sua utilização na produção de mudas de espécies arbóreas nativas, contribuindo com a cadeia produtiva da Restauração Florestal, e ainda, sendo uma destinação sustentável. Inicialmente foram testados dois compostos orgânicos, provenientes da compostagem dos resíduos da poda arbórea urbana da cidade do Rio de Janeiro e compostagem dos restos de alimentos do restaurante universitário da UFRRJ, na produção de mudas da espécie *Tabebuia aurea*. Foram avaliadas as concentrações de macro e micronutrientes, e o desenvolvimento da espécie em formulações de substratos com diferentes proporções dos compostos. A adição do composto orgânico de restos de alimentos nas formulações aumentou os teores de macronutrientes, e proporcionaram maior crescimento, gerando mudas de melhor qualidade e reduzindo a necessidade do substrato comercial. Na segunda etapa do estudo, foram avaliados os parâmetros físicos e químicos dos substratos com crescentes proporções de cascalho de perfuração de poços de petróleo *onshore* e substrato comercial, bem como o crescimento e qualidade das mudas de *Tabebuia roseoalba* produzidas nos substratos. O cascalho *onshore* possui grande potencial de uso como componente condicionador para substrato na produção das mudas, com teores de metais adequados ao cultivo de plantas e promovendo melhoria nos parâmetros físicos e químicos dos componentes das formulações. Os resíduos podem ser utilizados na formulação proporcionando maior desenvolvimento, melhor qualidade das mudas de *T. roseoalba* e adequando parâmetros essenciais para a produção. Na terceira etapa da pesquisa, foi avaliada a eficiência dos cascalhos de poços de petróleo *onshore* (terrestre) e *offshore* (marítimo) camada pré-sal e pós-sal, na composição de substratos para produção de duas espécies de diferentes grupos sucessionais, sendo a espécie pioneira *Enterolobium contortisiliquum* e não-pioneira *Tabebuia roseoalba*, e a simulação do quantitativo de cascalho possíveis de serem reciclados na produção em larga escala. Os cascalhos *onshore* e *offshore* pós-sal, promoveram crescimento e qualidade superior para as mudas de ambas as espécies. A reciclagem do cascalho na produção em larga escala pode atingir valores de até 800 mil toneladas do resíduo destinados de forma limpa e sustentável. O emprego de resíduos orgânicos urbanos e industriais petrolíferos na composição de substratos se mostrou eficiente na transformação dos resíduos em coprodutos de uso agrícola e florestal.

Palavras-chave: Espécies nativas, Reciclagem, Composto orgânico, Cascalho *onshore*, Cascalho *offshore*, Formulação de substratos, Sustentabilidade.

GENERAL ABSTRACT

MENDONÇA, Victória Maria Monteiro. **Oil and urban organic wastes allied to forest restoration.** 2023. 93p. Thesis (Doctorate in Environmental and Forestry Sciences, Silviculture). Instituto de Florestas, Departamento de Silvicultura, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2023.

Solid waste is a growing problem in our increasingly consumerist and disposable world, which requires compliance with legislation and the adoption of more appropriate and cleaner practices to minimize its impact and protect the environment. Every day, tons of waste are produced and often disposed of inappropriately, affecting people's quality of life and degrading vital ecosystems. However, this problem can be turned into an opportunity for reuse and income generation through recycling, transforming solid waste into raw materials for new products, helping to reduce it. The reuse of solid waste in the formulation of substrates for the production of forest seedlings can favor water retention, the availability of macro and micronutrients and reduce the cost of forestry inputs. The aim of this research is to characterize and evaluate the potential of solid organic urban waste and industrial oil waste, with a view to using it to produce seedlings of native tree species, contributing to the Forest Restoration production chain, as well as being a sustainable destination. Initially, two organic composts were tested - composted urban tree pruning waste from the city of Rio de Janeiro and composted food waste from the UFRRJ university restaurant to produce seedlings of the *Tabebuia aurea* species. The macro and micronutrient concentrations and the development of the species in substrate formulations with different proportions of compost were evaluated. The addition of organic compost from food scraps to the formulations increased the macronutrient content and provided greater growth, generating better quality seedlings and reducing the need for commercial substrate. In the second stage of the study, the physical and chemical parameters of the substrates with increasing proportions of onshore oil well drilling gravel and commercial substrate were evaluated, as well as the growth and quality of the *Tabebuia roseoalba* seedlings produced in the substrates. The onshore gravel has great potential for use as a conditioning component for the substrate in the production of seedlings, with metal contents suitable for growing plants and promoting improvements in the physical and chemical parameters of the formulation components. The waste can be used in the formulation, providing greater development and better quality for the *T. roseoalba* seedlings and adapting essential parameters for production. In the third stage of the research, the efficiency of gravels from onshore and offshore oil wells in the pre-salt and post-salt layers was evaluated in the composition of substrates for the production of two species from different successional groups, the pioneer species *Enterolobium contortisiliquum* and the non-pioneer species *Tabebuia roseoalba*, and the simulation of the amount of gravel that could be recycled in large-scale production. The onshore and offshore post-salt gravels promoted superior growth and quality for the seedlings of both species. The recycling of gravel in large-scale production can reach values of up to 800,000 tons of waste destined in a clean and sustainable way. The use of organic urban and industrial oil waste in the composition of substrates proved to be efficient in transforming waste into co-products for agricultural and forestry use.

Keywords: Native species, Sustainability, Recycling, Organic Compost, Onshore gravel, Offshore gravel.

SUMÁRIO

I. INTRODUÇÃO GERAL.....	1
CAPÍTULO I.....	4
REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS URBANOS NA PRODUÇÃO DE MUDAS DE <i>Tabebuia aurea</i>	4
RESUMO.....	1
ABSTRACT.....	2
1. INTRODUÇÃO.....	3
2. MATERIAL E MÉTODOS	4
2.1. Área de estudo e Delineamento experimental.....	4
2.2. Caracterização química dos componentes e substratos formulados	5
2.3. Produção das mudas	5
2.4. Avaliação morfológica.....	6
2.5. Análise dos dados.....	7
3. RESULTADOS	7
3.1. Determinação dos teores de macro, micronutrientes e metais nos substratos	7
3.2. Avaliação morfológica e Estado nutricional das mudas	8
4. DISCUSSÃO	14
5. CONCLUSÕES	16
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	16
CAPÍTULO II.....	19
CASCALHOS DE PERFURAÇÃO PROVENIENTES DA EXPLORAÇÃO DE PETRÓLEO MELHORAM PROPRIEDADES DO SUBSTRATO E CRESCIMENTO DE MUDAS DE IPÊ-BRANCO (<i>Tabebuia roseoalba</i>).....	19
RESUMO.....	20
ABSTRACT.....	21
1. INTRODUÇÃO.....	22
2. MATERIAL E MÉTODOS	23
2.1. Área de estudo e Delineamento experimental.....	23
2.2. Caracterização física e química dos substratos.....	24
2.3. Crescimento, qualidade e nutrição das mudas	25
2.4. Análise de dados.....	26
3. RESULTADOS	26
3.1. Características físicas e químicas dos substratos formulados.....	26
3.2. Crescimento e qualidade das mudas de ipê-branco.....	28
3.3. Estado nutricional das mudas de ipê-branco.....	33
4. DISCUSSÃO	35
4.1. Efeitos das proporções de cascalho nas características físicas e químicas dos substratos	35
4.2. Efeito das proporções de cascalho no desenvolvimento de mudas.....	36
4.3. Estado nutricional das mudas de ipê-branco.....	36
5. CONCLUSÕES	37
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	37

CAPÍTULO III.....	42
POTENCIAL DE APROVEITAMENTO DOS CASCALHOS DE PERFURAÇÃO OFFSHORE E ONSHORE NA PRODUÇÃO DE MUDAS FLORESTAIS EM LARGA ESCALA	42
RESUMO.....	43
ABSTRACT.....	44
1. INTRODUÇÃO.....	45
2. MATERIAL E MÉTODOS	46
2.1. <i>Área de Estudo e Delineamento Experimental</i>	46
2.2. <i>Descrição dos componentes dos substratos</i>	47
2.3. <i>Caracterização dos substratos</i>	48
2.4. <i>Produção das mudas</i>	48
2.5. <i>Avaliação morfológica</i>	49
2.6. <i>Determinação do quantitativo de resíduos (cascalhos) reaproveitados na produção em larga escala</i>	49
2.7. <i>Análise dos dados</i>	50
3. RESULTADOS	50
3.1. <i>Caracterização dos substratos</i>	50
3.2. <i>Avaliação morfológica</i>	54
3.4. <i>Estimativa do quantitativo de resíduo (cascalho) a ser reaproveitado na produção em larga escala</i>	63
4. DISCUSSÃO	63
5. CONCLUSÕES	69
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69
II. CONCLUSÕES GERAIS.....	74
III. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	75
IV. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	75

I. INTRODUÇÃO GERAL

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) possui como um de seus objetivos o cumprimento da seguinte ordem de prioridade: “Não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamentos dos resíduos sólidos, bem como a disposição final ambientalmente adequado dos rejeitos” (Brasil, 2010; Zago e Barros, 2019). Sendo considerado rejeitos “aqueles resíduos sólidos em que foram esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, sendo o aterro sanitário a única tecnologia permitida para essa finalidade” (Brasil, 2010).

A gestão de resíduos se tornou um desafio cada vez mais complexo com o crescimento populacional e o desenvolvimento de novas tecnologias, especialmente após a revolução industrial (Pires e Ferrão, 2017). O aumento da produção de resíduos, a diversificação dos materiais utilizados na fabricação de produtos e a falta de políticas adequadas para a gestão dos resíduos ocasionou em problemas ambientais graves e irremediáveis, como a poluição do solo, da água, do ar, além dos impactos sociais e a saúde humana.

Os resíduos são classificados dependendo da sua origem, composição e potencial de impacto. Dentre as classificações estão: os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), que são resíduos produzidos nas atividades diárias das cidades, como restos de alimentos, embalagens, papel, plástico, vidros, restos vegetais de manutenção de praças e jardins, entre outros; e os resíduos industriais, são os gerados pelos processos produtivos das indústrias, como resíduos químicos, metais, plásticos, óleos, entre outros (Brasil, 2010).

Zago e Barros (2019), explicitam que no Brasil, já existe o mínimo de sensibilização com relação as questões ambientais, sociais e econômicas para alguns resíduos reconhecidamente valorados, como plástico, metal, vidro e papel, mesmo assim muito aquém do necessário. Ainda assim, existem milhões de toneladas de resíduos orgânicos e industriais dispostos de maneira inadequada, devido ao desconhecimento sobre seu potencial econômico, ambiental e social, ou mesmo só pela falta de preocupação em modificar o como já é feito.

A fração orgânica dos RSU, é composta basicamente por restos de alimentos, resíduos de poda da arborização urbana e jardinagem, correspondendo a 50% de todo RSU gerado no Brasil (EMBRAPA, 2021). O processo de reaproveitamento é uma forma de mitigar parte do problema dos RSU, dando um destino útil aos resíduos orgânicos, que são naturalmente ricos em nutrientes, e evitando a sua acumulação em aterros, diminuindo a emissão de gases de efeito estufa (GEEs), e melhorando os atributos do solo, a partir da devolução dos nutrientes a terra, adicionalmente promovendo o aumento da capacidade de retenção de água, permitindo o controle da erosão e evitando o uso de fertilizantes sintéticos (AMCB, 2006).

Existe uma enorme geração de resíduos em decorrência da vida cotidiana do ser humano RSU em função dos moldes estabelecidos pela sociedade, sendo esta fração inclusive de difícil mensuração e proveniente das atividades industriais.

A indústria do petróleo e gás natural tem um papel essencial na matriz energética mundial, só no ano de 2018 a produção de ambos correspondeu a 46,9% da energia ofertada no Brasil (EPE, 2019). Segundo os dados do IEA (2016), o petróleo e o gás são responsáveis por 39,9% e 15,1%, respectivamente, do consumo total de energia mundial. Apesar da sua importância, as fontes de energia não renováveis estão associadas a atividades que podem resultar em impactos ambientais em toda sua cadeia produtiva (Almeida et al., 2017).

Mendes et al. (2017), destaca no relatório “Panoramas Setoriais 2030: petróleo e gás”, a necessidade do setor industrial mundial em que 64% são atendidas pelo setor de petróleo e gás, além de 25% da geração de energia elétrica mundial. Atualmente 56% de energia primária consumida globalmente é abastecida pelo setor de petróleo e gás, e até o ano de 2030, mesmo com todos os esforços para geração de energias mais limpas e renováveis, considerando o crescimento anual esperado da demanda energética, a participação do setor de petróleo e gás deverá ser de 54,6%, mantendo a dependência desse setor (Mendes et al., 2017).

São diversos os passivos decorrentes da utilização do petróleo, dentre eles destacam-se os cascalhos de perfuração de origem terrestre (*onshore*) e marítima (*offshore*), pelo excessivo volume gerado, com composição heterogênea e grande potencial de contaminação ambiental (IOGP, 2016; Almeida et al., 2017; Bandeira, 2019; Cruz, 2022), devido à presença de diversos poluentes seu gerenciamento é considerado extremamente difícil (Kazaminas e Zorpas, 2021). Segundo EPA (2000), o volume de resíduo gerado por um poço pode variar entre 0,12 e 1,2 m³ de cascalho a cada metro vertical perfurado, sendo a quantidade variável de acordo com os atributos do poço, como profundidade, diâmetro, características geológicas das formações perfuradas e tipo de fluido utilizado.

O cascalho de perfuração é um resíduo industrial proveniente da rocha britada pela perfuratriz durante o processo de abertura do poço de petróleo, após, o cascalho atinge à superfície do poço junto com o fluido, também utilizado na perfuração (Ribeiro et al., 2022), o qual pode conter elementos como a baritina (BaSO₄), sódio (Na), hidrocarbonetos e metais (IOGP, 2016; Kazaminas e Zorpas, 2021), sendo o termo cascalho empregado na indústria do petróleo para qualquer tipo de sedimento retirado do poço, seja de granulometria fina ou grossa (Bandeira, 2019).

No início da indústria de operação de petróleo e gás, os resíduos de perfuração eram descartados após a operação de perfuração diretamente no aterro ou no oceano, o que causava severa poluição ambiental no local de despejo e nas zonas circundantes (Njuguna et al., 2022). Hoje, a disposição final dos resíduos, ainda é uma das principais dificuldades enfrentadas pelas indústrias e estados da federação, principalmente, por necessitarem de maiores investimentos financeiros e diferentes técnicas para sua neutralização. De Almeida et al. (2017), enfatiza a existência de uma lacuna contrastante entre as alternativas existentes para o gerenciamento dos cascalhos e a atual adoção de técnicas menos sustentáveis, como a disposição em aterros de resíduos sólidos.

Definir uma estratégia de gerenciamento de resíduos é um processo desafiador, afetando tanto a cadeia de valor quanto o desenvolvimento econômico, incorporando diversas variáveis que são diretamente afetadas por aspectos técnicos específicos, que devem ser considerados na avaliação da sustentabilidade de soluções alternativas (Zorpas, 2020; Njuguna et al., 2022), considerando ao mesmo tempo as metas estabelecidas na Agenda 2030 da ONU (ONU, 2015).

O termo sustentabilidade após o ano de 2015, significa inevitavelmente, apoiar-se nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), propostos pela Organização das Nações Unidas (ONU), os quais podem embasar a abordagem das opções de reaproveitamento dos resíduos. Os 17 ODS, buscam assegurar a integração das dimensões: social, ambiental e econômico, tornando as indústrias parte essencial para implementação dos ODS, já que são grandes detentoras do poder econômico, propulsoras de inovações e tecnologias influenciadoras e engajadora de diversos públicos (governos, fornecedores, colaboradores e consumidores) (Pacto Global, 2023).

Recentemente, foi selado o acordo que estabeleceu a meta de restaurar 500 Mha de áreas degradadas no planeta até 2050, iniciada pela década da restauração estabelecida pelas Nações Unidas - 2020 a 2030 (PNUMA, 2019). Porém, para atender a essas metas, toda a cadeia da restauração ecossistêmica precisa ser fortalecida, devido ao descompasso existente entre a produção de insumos e as demandas da restauração (Melo et al., 2013; Silva et al., 2021; Perussi et al., 2022), especialmente quanto a produção de mudas arbóreas nativas.

A reutilização de resíduos já deixou de ser opcional e se tornou uma tarefa obrigatória para manutenção do equilíbrio da vida no planeta Terra. A reciclagem de diversos resíduos (orgânicos, agropecuários e industriais) na formulação de substratos para produção de mudas florestais, vem sendo cada vez mais difundido (Abreu et al., 2019; Silva et al., 2020; Araújo et al., 2020; Silva et al., 2021; Cunha et al., 2022). Por serem materiais gerados em grandes

quantidades, de baixo custo, e muitas vezes fontes naturais de nutrientes, sendo três dos grandes gargalos enfrentados pelos produtores de mudas.

Considerando que o desenvolvimento adequado das mudas florestais em viveiros, é diretamente dependente da qualidade do substrato utilizado, e no sentido de aumentar as informações a respeito de proporções a serem utilizadas e a resposta das espécies nativas as mesmas, bem como aumentar as possibilidades de reciclagem do cascalho de perfuração de poços de petróleo, a presente tese teve como objetivo viabilizar a reutilização dos resíduos sólidos orgânicos urbanos e industriais cascalho *onshore* e cascalho *offshore* (pré-sal e pós-sal) na produção de mudas florestais nativas para restauração florestal.

Sob a hipótese que a produção de mudas florestais é uma alternativa sustentável para reciclagem do resíduo petrolífero cascalho de perfuração e dos resíduos sólidos urbanos orgânicos, em atendimento aos objetivos específicos da tese em consonância com os ODS: 6. Água potável e Saneamento, 9. Indústria Inovação e Infraestrutura, 12. Consumo e Produção Responsáveis, 13. Ação Contra a Mudança Global do Clima e 15. Vida terrestre, o trabalho foi realizado em três capítulos:

Capítulo I: Reaproveitamento de resíduos orgânicos urbanos na produção de mudas de *Tabebuia aurea*.

Capítulo II: Resíduos petrolíferos melhoram as propriedades físicas e químicas de substratos e contribuem para o desenvolvimento e nutrição de mudas florestais.

Capítulo III: Cascalhos de perfuração na produção de mudas nativas amplamente utilizadas na restauração florestal.

CAPÍTULO I

REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS URBANOS NA PRODUÇÃO DE MUDAS DE *Tabebuia aurea*

RESUMO

Os resíduos sólidos urbanos orgânicos desde muito tempo apontados como problemáticos, devido ao alto custo para destinação e enormes volumes gerados, são na realidade matéria-prima rica em nutrientes para utilização no setor agrícola e florestal. Sendo assim, esse estudo teve por objetivo avaliar o potencial dos resíduos orgânicos, provenientes da poda urbana e restos alimentícios, como componentes de substrato na produção de mudas de *Tabebuia aurea*. Foram utilizados 3 componentes em diferentes proporções volumétricas: substrato comercial (SC), composto orgânico de resíduos da poda arbórea (CP) e composto orgânico de resíduos de alimentos (CA). Adotou-se o delineamento inteiramente casualizados (DIC), com 9 tratamentos e 3 repetições, cada repetição com 5 mudas. Após germinação em sementeira, as plântulas foram repicadas para tubetes de 280 cm³. Aos 270 dias foram avaliadas altura (cm), diâmetro de coleto (mm), matéria seca (g) produzida, Índice de qualidade de Dickson (IQD) e as concentrações dos macronutrientes no material vegetal. As formulações com SC e CP proporcionaram maiores valores para as variáveis de crescimento, enquanto as formulações testemunha e com CA favoreceram os maiores teores de macronutrientes. O crescimento das mudas foi limitado pelo tubete (280cm³) em função do tempo de desenvolvimento.

Palavras-chave: Composto orgânico, Arborização urbana, Resíduos de alimentos, Viveiros florestais, Espécies nativas, Compostagem.

ABSTRACT

Organic municipal solid waste, which has long been considered a problem due to the high cost of disposal and the huge volumes generated, is actually a nutrient-rich raw material for use in the agricultural and forestry sectors. The aim of this study was therefore to evaluate the potential of organic waste from urban pruning and food waste as a substrate component in the production of *Tabebuia aurea* seedlings. Three components were used in different volumetric proportions: commercial substrate (SC), organic compost from tree pruning waste (CP) and organic compost from food waste (CA). A completely randomized design was used, with 9 treatments and 3 replications, each with 5 seedlings. After germination in a seedbed, the seedlings were transplanted into 280 cm³ tubes. At 270 days, height (cm), collar diameter (mm), dry matter (g) produced, Dickson Quality Index (DQI) and macronutrient concentrations in the plant material were assessed. The formulations with SC and CP provided the highest values for the growth variables, while the control and CA formulations favored the highest macronutrient levels. The growth of the seedlings was limited by the tubing (280cm³) as a function of development time.

Keywords: Organic compost, Urban forestry, Food waste, Forest nurseries, Native species.

1. INTRODUÇÃO

A gestão de resíduos urbanos é um grande desafio para os formuladores de políticas e planejadores no desenvolvimento de cidades inteligentes sustentáveis (Awasthi et al., 2021), devido aos diversos impactos ambientais negativos e risco à saúde quando descartados de forma inadequada. A dificuldade na gestão dos resíduos sólidos urbanos (RSU), é observada na maioria dos municípios brasileiros, principalmente quanto aos resíduos da arborização urbana, pois não são uma prioridade nas agendas municipais (Araújo et al., 2018).

A fração orgânica dos RSU, é composta basicamente por restos de alimentos, resíduos de poda da arborização urbana e jardinagem, correspondendo a 50% de todo RSU gerado no Brasil (EMBRAPA, 2021). O processo de reaproveitamento é uma forma de mitigar parte do problema dos RSU, dando um destino útil aos resíduos orgânicos, por exemplo, evitando a sua acumulação em aterros, diminuindo a emissão de gases de efeito estufa (GEEs), e melhorando a estrutura do solo, a partir da devolução dos nutrientes ao solo, aumentando a capacidade de retenção de água, favorecendo o controle da erosão e evitando o uso de fertilizantes minerais (AMCB, 2006).

Além da crescente necessidade de alternativas sustentáveis para a destinação dos RSU, a demanda por mudas arbóreas nativas, seja para plantios de reflorestamento, projetos de recuperação de áreas, arborização urbana, entre outros, aumenta a cada ano (Araújo et al., 2018; Pinto et al., 2020; Perussi et al., 2022). Se fazendo cada vez mais necessário o desenvolvimento de alternativas sustentáveis, de métodos assertivos e redução de custos, na produção de mudas de qualidade em larga escala em consonância com a Agenda 2030 estabelecida pela Organização das Nações Unidas – ONU (ONU, 2015).

Entre as espécies recomendadas para recuperação de áreas degradadas, podemos destacar a *Tabebuia aurea* (Silva Manso) Benth & Hook.f., popularmente conhecida como Ipê carafba, Craibeira, Paratudo, Caroba-do-campo, Ipê amarelo do cerrado, entre outros, é pertencente à família Bignoniaceae e de ocorrência nos biomas Amazônia, Caatinga, Cerrado, Mata Atlântica e Pantanal (Lohmann, 2023). A espécie possui madeira resistente, indicada para diversos usos, como carpintaria, carvão vegetal, medicina popular (Dantas et al., 2018), incluindo o tratamento de picadas de cobra na medicina tradicional (Nocchi et al., 2020), arborização urbana, paisagismo (Lorenzi, 1998), e em plantios florestais, sendo indicada para áreas degradadas por apresentar crescimento satisfatório em solos salinizados (Dantas et al., 2018).

O substrato é um fator que exerce influência direta no desenvolvimento das mudas, pois possui a função de proporcionar condições adequadas para o crescimento da planta, e são muitos os materiais que podem, na sua composição original ou combinados, serem usados (Caldeira et al., 2008; Pinto et al., 2020; Cunha et al., 2022). A produção de substratos também apresenta restrições, principalmente em regiões isoladas, as quais o acesso a substratos comerciais e dependentes de fertilizantes minerais são escassos e onerosos (Araújo et al., 2017).

A utilização dos resíduos orgânicos se tornou uma tendência na composição de substratos, pois na adição de fontes de matéria orgânica há contribuição para o fornecimento de nutrientes, para as características físicas do meio de cultivo (Vieira et al., 2014), e baixo custo. Entretanto, é difícil encontrar um único material que atenda a todas as exigências necessárias (Kratz et al., 2013). Em todos os estados do Brasil são encontrados muitos resíduos orgânicos, com potencial para serem utilizados na composição de substratos para produção de mudas, entre eles a biomassa vegetal oriunda da poda da arborização urbana e os restos de alimentos.

Diante da necessidade de destinações mais limpas e sustentáveis para os RSU orgânicos, e da carência de informações a respeito do desenvolvimento da *Tabebuia aurea* utilizando diferentes materiais de fácil acesso. Esse estudo tem o objetivo avaliar o potencial dos resíduos orgânicos urbanos, provenientes da compostagem de resíduos de poda arbórea da cidade do Rio de Janeiro, e da compostagem de restos de alimento da Universidade Federal Rural do Rio de

Janeiro – UFRRJ (campus Seropédica/RJ), como substratos na produção de mudas de *Tabebuia aurea*.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de estudo e Delineamento experimental

O experimento foi conduzido de janeiro a novembro de 2020 no viveiro do Instituto de Florestas, da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, localizada no município de Seropédica – RJ, sob as coordenadas geográficas 22° 44' 38" S e 43° 42' 27" W, e a 26 metros de altitude. O clima da região é do tipo Aw, identificado como tropical com verão chuvoso e inverno seco, segundo a classificação de Köppen, (Alvares et al., 2013), com precipitação média anual de 1.245 mm, sem estação seca definida, e temperatura média anual de 23,7°C (Melo et al., 2018).

Adotou-se o delineamento inteiramente casualizado (DIC), com nove tratamentos (09), sendo cada um com três (03) repetições e cinco (05) mudas, totalizando 135 mudas. Foram formulados nove (09) substratos (tratamentos) com diferentes proporções do composto de poda (CP), composto de alimentos (CA) e substrato comercial (SC) Mecplant® Florestal 3, para a produção da espécie *Tabebuia aurea* (Silva Manso) Benth. & Hook.f. ex S.Moore – Ipê caráiba, como apresentado na Tabela 1.

O composto de poda (CP) é proveniente da compostagem dos resíduos de poda da arborização urbana da cidade do Rio de Janeiro, fornecidos pela Companhia Municipal de Limpeza Urbana (COMLURB), produzido por Mendonça et al. (2021); o composto de alimentos (CA) foi produzido através da compostagem dos restos de alimentos do restaurante universitário do campus Seropédica da UFRRJ, pelos alunos do alojamento universitário descrito em Oliveira et al. (2020); e o substrato comercial é composto de casca de pinus bioestabilizada. As sementes de *T. aurea* foram provenientes de matrizes, localizadas em Jataí-GO, sendo coletadas sementes de 15 indivíduos arbóreos, distribuídos na cidade de Jataí e no Câmpus da Universidade Federal de Jataí (UFJ).

Tabela 1. Proporções dos componentes utilizados nas formulações dos tratamentos (substratos) para produção de mudas de *Tabebuia aurea*.

Tratamento	Substrato Comercial	Composto de Poda	Composto de Alimentos
		%	
1	100	-	-
2	75	25	-
3	75	-	25
4	50	25	25
5	25	50	25
6	25	25	50
7	-	50	50
8	-	75	25
9	-	25	75

2.2. Caracterização química dos componentes e substratos formulados

Foram coletadas amostras dos substratos homogeneizados antes de acrescentar a adubação de base ao traço. Determinou-se nas formulações de substrato e nos componentes (SC, CP e CA) (Tabela 2), os teores de nitrogênio (N) (Tedesco et al., 1995), os teores totais dos nutrientes (P, K⁺, Ca⁺², Mg⁺² e Na⁺) e metais (Cd, Cu, Pb, Mn, Ni, Cr, Zn e Fe) de acordo com o descrito pelo método da USEPA 3050B (USEPA, 1998).

Tabela 2. Teores dos diferentes elementos indicadores do potencial agrônômico determinados nos componentes empregados nas formulações dos substratos (tratamentos).

Componente	N	P	K ⁺	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺	Fe
-----g kg ⁻¹ -----							
Composto de poda	37,66	9,42	79,93	18,21	4,16	0,79	1,60
Composto de comida	43,79	10,88	65,65	13,12	6,07	5,21	5,44
MecPlant	23,46	10,86	20,61	25,4	37,32	0,61	5,65
Componente	Cu	Ni	Mn	Pb	Zn	Cr	Cd
-----mg kg ⁻¹ -----							
Composto de poda	8,07	11,40	118,50	ND	96,91	15,60	ND
Composto de alimentos	13,93	7,97	210,50	ND	119,60	11,20	ND
MecPlant	13,90	96,78	198,20	1,97	40,01	53,60	ND

Legenda: ND – não detectado.

2.3. Produção das mudas

Para a produção das mudas utilizou-se tubetes de 280 cm³, os quais foram dispostos em bandejas plásticas, com capacidade para 54 recipientes, e alocadas em canteiros no chão sobre brita (Figura 1D), após três meses transferidas para bancadas suspensas. Os substratos foram homogeneizados em betoneira e adicionados 5 g L⁻¹ de adubo (NPK 14-14-14) encapsulado de liberação controlada. Posteriormente, os tubetes foram preenchidos manualmente, com os substratos previamente umedecidos, facilitando a acomodação no interior do recipiente.

As mudas de *T. aurea* foram produzidas por semeadura indireta, a fim de evitar interferência dos resíduos na germinação. As sementes foram dispostas em sementeiras de alvenaria, preenchidas com areia lavada e cobertas com sombrite até a germinação (Figura 1A). Após 30 dias da germinação em sementeira, foram selecionadas as plântulas de maior vigor e alturas próximas e repicadas para os tubetes (Figura 1B e 1C), sendo realizada uma segunda repicagem 3 dias após a primeira, para substituição das plântulas mortas. A irrigação foi realizada por sistema de microaspersão, duas vezes ao dia (início da manhã e final da tarde), e de acordo com a necessidade das mudas, através de análise visual.

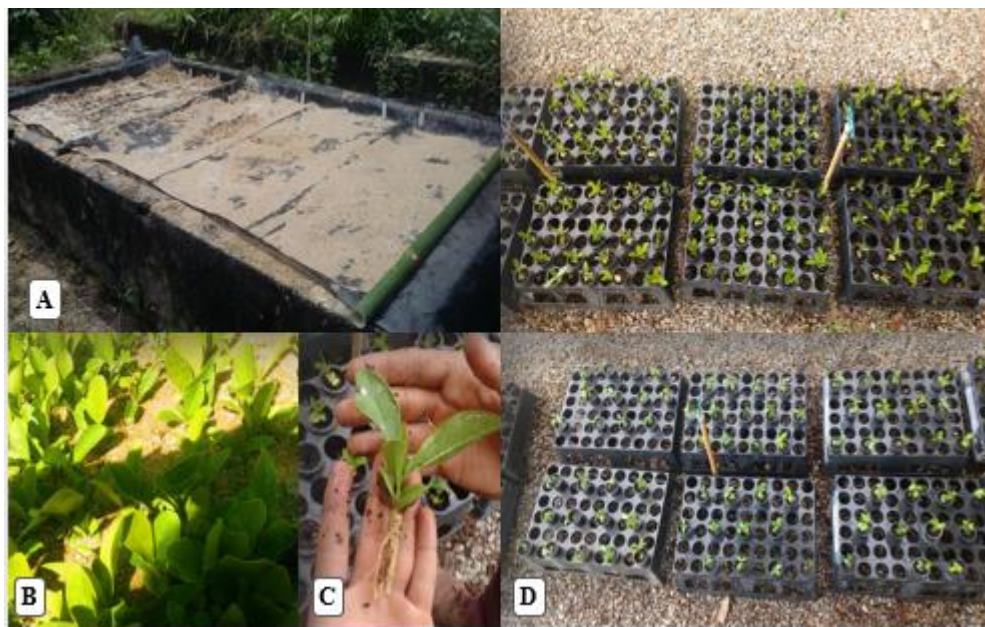


Figura 1. A – sementeira preenchida com areia lavada onde foi realizada a semeadura da *T. aurea*; B – plântulas de *T. aurea* em desenvolvimento na sementeira; C – plântula de *T. aurea* aos 20 dias após germinação; D – plântulas de *T. aurea* repicadas para tubetes de 280 cm³.

Aos 30 dias após repicagem, realizou-se uma nova distribuição das mudas (manejo denominado dança), modificando o espaçamento nas bandejas, que ficaram com 50%, diminuindo-se desta forma a competição por luz e facilitando a chegada de água da irrigação até o substrato. Sempre que verificada, por análise visual, foi realizada a retirada de plantas espontâneas dos tubetes (manejo denominado monda).

A partir dos 120 dias após a repicagem, foram feitas adubações de cobertura quinzenalmente, com KCl (cloreto de potássio) e (NH₄)₂SO₄ (sulfato de amônio), intercalados, na proporção de 260 g e 1000 g, respectivamente, diluídos em 100 L de água, utilizando regadores, até os 240 dias de desenvolvimento.

2.4. Avaliação morfológica

A avaliação da qualidade das mudas e seu desenvolvimento foi realizada por meio da mensuração das variáveis altura da parte aérea (H), com o auxílio de régua milimétrica, e diâmetro de coleto (DC), com paquímetro digital (resolução de 0,01 mm/0.0005”) e exatidão de ± 0,03 mm). As avaliações foram iniciadas 30 dias após a repicagem e feitas mensalmente, até o final do experimento (30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240 e 270 dias).

Aos 270 dias determinou-se nas folhas das mudas o índice de clorofila total (CF), com o auxílio do aparelho CloroFiloG – Falker. Posteriormente, as mudas foram retiradas dos tubetes e, pelo método destrutivo, foi avaliada a área foliar (AF) medida com o aparelho LICOR LI-3100-AREA METER. Para a determinação da avaliação da biomassa, as mudas foram segmentadas em 3 compartimentos: folhas, coleto e raiz. Os compartimentos foram acondicionados em sacos de papel, identificados e levados a estufa com circulação de ar forçada, onde permaneceram a 65°C, durante 72 horas. Em seguida, foram pesadas para determinação da massa de matéria seca das folhas (MSF), da massa de matéria seca do coleto (MSC), da massa de matéria seca da raiz (MSR), pela soma da MSF e MSC a massa de matéria seca da parte aérea (MSPA), e pela soma da MSPA e MSR a massa de matéria seca total (MST).

A partir dos dados obtidos foram calculados os seguintes parâmetros de qualidade: relação altura / diâmetro de coleto (H/DC); relação massa de matéria seca da parte aérea / massa de matéria seca de raiz (MSPA/MSR) e o índice de qualidade de Dickson (IQD) (Dickson et al., 1960), por meio da expressão matemática:

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

Em que: IQD: índice de qualidade de Dickson; MST: massa seca total (g); H: altura das mudas (cm); DC: diâmetro do coleto (mm); MSPA: massa seca da parte aérea (folhas, ramo e coleto) (g); MSR: massa seca de raiz (g).

Os compartimentos após pesagem, foram moídos em moinho de facas e reunidas as mudas de cada repetição para formar uma amostra composta. O material foi pesado para digestão sulfúrica (Tedesco et al., 1995) e digestão nítrica USEPA 3050A (USEPA, 1998), e determinados os teores de nitrogênio (N), fósforo (P), sódio (K), cálcio (Ca^{+2}), magnésio (Mg^{+2}) e sódio (Na^{+}).

2.5. Análise dos dados

Os dados foram submetidos às análises de normalidade (teste de Shapiro Wilk, 5%) e homogeneidade da variância dos erros (teste de Levene, 5%), sendo, posteriormente, comparados por análise de variância (5%) e testes múltiplos de médias (Tukey, 5%). Como os dados não atenderam aos pressupostos estatísticos (normalidade e homogeneidade), optou-se por realizar análises não paramétricas (teste de Kruskal-Wallis, 5%). Todos os procedimentos estatísticos foram realizados no *software* R 2020.

3. RESULTADOS

3.1. Determinação dos teores de macro, micronutrientes e metais nos substratos

As diferentes proporções dos componentes proporcionaram teores distintos de nutrientes e metais, sendo a caracterização química dos substratos (tratamentos) apresentada na Tabela 3. Analisando os teores dos macro, micronutrientes e metais pesados, numericamente, nota-se que de forma geral, nos substratos com menores proporções de SC foram aqueles com maiores teores de N, P e K, com exceção ao substrato 2 (75%SC:25%CP) no qual foi observado teor de P próximo a S5, S6, S7 e S8 (25%, 25%, 0% e 0% de SC, respectivamente). Em contrapartida, os maiores teores de Ca e Mg foram quantificados nos substratos com maiores proporções do SC (S1, S2 e S3), principalmente em relação as formulações que não possuem SC (S7, S8 e S9). Quanto aos micronutrientes e metais, de maneira geral, os tratamentos com substrato comercial (S1, S3 e S4) e o substrato com maior proporção do composto de alimentos (S9), são aqueles que apresentam os maiores teores destes elementos.

Tabela 3. Teores totais de macronutrientes, micronutrientes e metais determinados nos substratos (tratamentos) empregados na produção das mudas de *Tabebuia aurea*.

Substrato	Composição SC:CP:CA (%)	Teores						
		N	P	K ⁺	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺	Pb
		g kg ⁻¹						
S1	100:00:00	22,08	0,22	7,75	38,43	40,36	0,11	ND
S2	75:25:00	13,35	1,58	14,71	37,58	35,54	0,18	ND
S3	75:00:25	33,71	1,18	14,68	31,44	28,56	0,71	ND
S4	50:25:25	39,59	0,91	22,86	24,84	22,34	0,88	ND
S5	25:50:25	39,25	1,45	25,62	28,59	16,51	0,88	ND
S6	25:25:50	45,85	1,68	25,65	21,38	13,63	1,30	ND
S7	00:50:50	42,22	1,26	32,05	20,10	4,51	1,31	ND
S8	0:75:25	40,26	1,33	33,51	17,35	4,38	1,00	ND
S9	0:25:75	53,49	1,13	31,46	21,88	4,80	1,85	ND

Substrato	Composição SC:CP:CA (%)	Teores						
		Cu	Mn	Cd	Zn	Cr	Ni	Fe
		mg kg ⁻¹						
S1	100:00:00	13,10	152,20	0,15	24,80	15,23	33,11	3891,74
S2	75:25:00	11,18	149,84	0,41	44,21	15,30	34,35	3659,88
S3	75:00:25	13,61	176,74	0,55	42,18	ND	17	5131,32
S4	50:25:25	12,60	174,88	0,60	51,68	3,95	20,38	3884,63
S5	25:50:25	10,39	142,38	0,60	59,53	0,91	7,48	2354,87
S6	25:25:50	11,33	174,69	0,67	53,23	1,14	6,79	3561,69
S7	00:50:50	10,25	150,32	0,64	62,16	8,32	ND	2796,69
S8	0:75:25	10,96	155,11	0,68	66,95	5,57	ND	2772,59
S9	0:25:75	12,40	175,58	0,84	77,38	2,27	ND	4347,98

Legenda: ND – não detectado.

3.2. Avaliação morfológica e Estado nutricional das mudas

Todas as variáveis de crescimento e qualidade analisadas foram significativamente diferentes em função das formulações dos substratos. Aos 270 dias, constatou-se diferença significativa para H e DC (Figura 2 e Tabela 4), sendo os maiores valores médios que apresentaram diferença ($p < 0,05$) de H, foram aqueles avaliados nas mudas desenvolvidas nas formulações S4 (50:25:25), S2 (75:25:0), S7 (0:50:50) e S6 (25:25:50), e a menor em S8 (0:75:25), Figura 2A. Já para o DC, apenas o substrato S8 (0:75:25) foi significativamente menor (Figura 2B e Tabela 4).

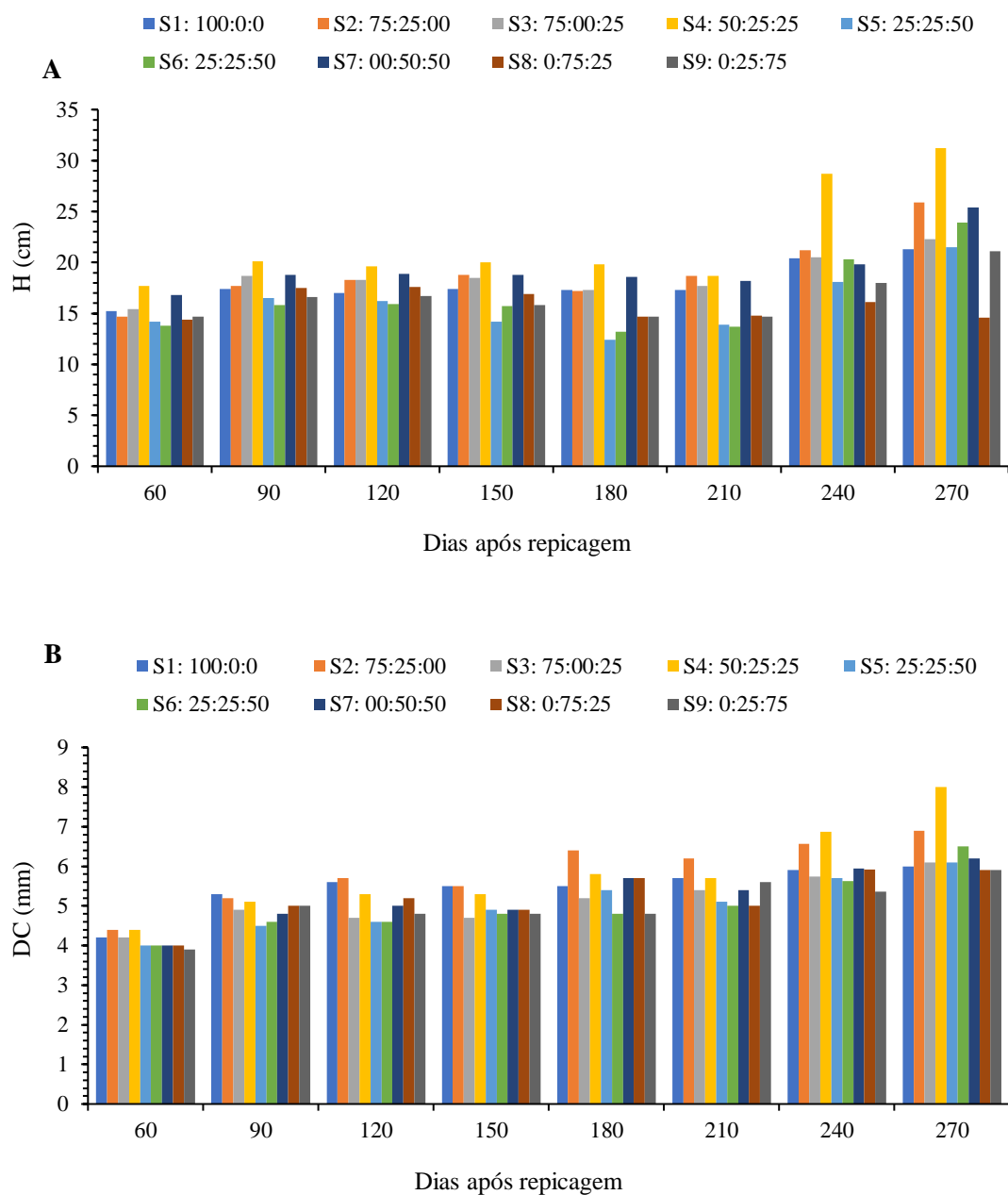


Figura 2. A – Crescimento médio em altura (H), e B – diâmetro de coleto (DC) das mudas de *T. aurea* aos 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240 e 270 dias de desenvolvimento. Legenda: SC – substrato comercial : CP – composto de poda : CA – composto de alimentos.

Tabela 4. Parâmetros morfológicos de crescimento e clorofila total das mudas de *T. aurea*, produzidas em diferentes substratos aos 270 dias de desenvolvimento.

Sub.	Composição SC:CP:CA %	H cm	DC mm	MSPA -----g-----	MSR	MST
S1	100:00:00	21,3 bc	6,0 ab	2,18 d	3,59 ab	5,76 c
S2	75:25:00	25,9 ab	6,9 ab	7,01 ab	6,06 ab	13,06 ab
S3	75:00:25	22,3 bc	6,1 ab	3,96 bcd	3,14 b	7,10 bc
S4	50:25:25	31,2 a	8,0 a	7,60 a	6,85 a	14,45 a
S5	25:50:25	21,5 bc	6,1 ab	4,92 abc	4,19 ab	9,12 abc
S6	25:25:50	23,9 ab	6,5 ab	3,93 abcd	2,62 b	6,55 bc
S7	00:50:50	25,4 ab	6,2 ab	3,60 abcd	3,27 ab	6,91 abc
S8	0:75:25	14,6 c	5,9 b	3,34 bcd	5,07 ab	8,46 abc
S9	0:25:75	21,1 bc	5,9 ab	3,08 cd	3,39 ab	6,47 bc

Sub.	Composição SC:CP:CA %	CF mg m ⁻²	AF cm ²	MSPA/MSR	H/DC	IQD
S1	100:00:00	40,96 b	236,58 c	0,61 b	3,55 a	1,35 ab
S2	75:25:00	48,26 a	516,49 ab	1,15 ab	3,75 ab	2,58 ab
S3	75:00:25	44,01 ab	399,34 abc	1,26 a	3,65 ab	1,78 ab
S4	50:25:25	47,14 a	550,55 a	1,10 ab	3,93 a	2,90 a
S5	25:50:25	44,57 ab	460,50 abc	1,17 a	3,52 ab	2,08 ab
S6	25:25:50	45,45 a	394,36 abc	1,50 a	3,68 ab	1,30 b
S7	00:50:50	45,86 a	288,46 bc	1,10 ab	4,10 a	1,32 ab
S8	0:75:25	44,05 ab	304,13 abc	0,66 b	2,46 b	2,89 ab
S9	0:25:75	46,48 a	262,95 c	0,91 ab	3,60 ab	1,48 ab

Legenda: Sub. – substrato; SC – substrato comercial; CP – composto de poda; CA – composto de alimentos; H – altura; DC – diâmetro de coleto; MSPA – massa seca da parte aérea; MSR – massa seca de raiz; MST – massa seca total; AF – área foliar; CF – clorofila total; MSPA/MSR – relação massa seca da parte aérea / massa seca de raiz; H/DC – índice de robustez (altura / coleto); e IQD – índice de qualidade de Dickson. Valores seguidos de letras diferentes na coluna, diferem entre si ($p < 0,05$), pelo teste de Kruskal-Wallis.

Os valores de clorofila (CF) foram significativamente maiores nos substratos S2 ao S9, sendo menor apenas para a formulação testemunha (100% SC - S1). Comportamento similar foi observado para área foliar (AF), em que o testemunha (S1) foi menor significativamente, acompanhado dos substratos com maior proporção do composto de resíduos de alimentos (S7 e S9) (Tabela 4), os demais tratamentos foram significativamente maiores.

Durante a segmentação das mudas em diferentes compartimentos (folhas, coleto e raiz), por análise visual, verificou-se desenvolvimento desigual das raízes em função do substrato (Figura 3), também, foi possível identificar um desenvolvimento limitado pelo recipiente utilizado na produção, (tubete de 280 cm³), o que pode ser observado na Figura 4.

As variáveis obtidas a partir das análises destrutivas das mudas são apresentadas na Tabela 4. A biomassa seca da parte aérea (MSPA) foi superior nos tratamentos S4 (50:25:25), S2 (75:25:0), S5 (25:50:25), S6 (25:25:50) e S7 (0:50:50). A biomassa seca das raízes (MSR), foi significativamente menor apenas nos tratamentos S3 (75:00:25) e S6 (25:25:50). Já para biomassa seca total (MST), nos tratamentos S4 (50:25:25), S2 (75:25:0), S5 (25:50:25), S7 (0:50:50) e S8 (0:75:25) foram determinados os maiores valores médios. O índice de qualidade

de Dickson (IQD), foi menor estatisticamente apenas para o tratamento S6 (25:25:50), sendo o S4 a maior média de IQD, numericamente.

Através da análise da Tabela 5, verifica-se que de maneira geral, as formulações com substrato comercial e composto de restos de alimentos, foram aquelas que proporcionaram maiores teores de macronutrientes no material vegetal, sendo estes observados nas formulações S1, S3, S5 e S6. A formulação S8 (75% CP + 25% CA), foi o tratamento com menores teores de macronutrientes determinados, principalmente no compartimento raiz, enquanto para a formulação S4 (50:25:25) os menores teores de macronutrientes foram verificados na parte aérea das mudas.



Figura 3. Raízes das mudas de *T. aurea* produzidas nos substratos S1 (100:0:0), S2 (75:25:0), S4 (50:25:25), S5 (25:50:25) e S8 (0:75:25), aos 270 dias após repicagem.



Figura 4. Raízes das mudas de *T. aurea* aos 270 dias após repicagem: S1.a - raiz produzida no substrato S1 - (100:0:0 - testemunha) em decomposição; S1.b - raiz produzida no substrato S1 (100:0:0 - testemunha) viva; S6 - raiz produzida no substrato S6 (25:25:50) em estágio de decomposição.

Tabela 5. Teores de nitrogênio (N), fósforo (P), sódio (K), cálcio (Ca²⁺), magnésio (Mg²⁺) e sódio (Na⁺) (g kg⁻¹) determinados nos compartimentos vegetativos (folha, caule e raiz) das mudas de *T. aurea* produzidas em diferentes substratos.

Sub.	Composição	N	P	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺
	SC:CP:CA (%)	Folha					
S1	100:00:00	47,11ab	19,49ab	19,26ab	34,56c	12,34a	1,23a
S2	75:25:00	39,24c	17,27b	14,43bc	38,62bc	11,16ab	1,11a
S3	75:00:25	49,70ab	21,12ab	16,05abc	33,56abc	7,91b	1,15a
S4	50:25:25	38,71c	17,36b	14,00c	37,73bc	8,78bc	1,10a
S5	25:50:25	45,80abc	20,97ab	15,88abc	49,58ab	8,40bc	1,28a
S6	25:25:50	52,12a	26,72a	21,72a	62,36a	11,32ab	1,26a
S7	00:50:50	43,10bc	20,21ab	13,99c	37,01bc	3,44d	1,19a
S8	00:75:25	38,67bc	20,51ab	14,73bc	33,54c	7,63bc	1,14a
S9	00:25:75	48,96ab	19,93ab	11,71c	42,68abc	4,22cd	1,23a
Sub.	SC:CP:CA (%)	Coletor					
S1	100:00:00	52,66abc	30,78ab	16,77a	35,55a	15,13a	1,16a
S2	75:25:00	45,98c	21,34b	18,67a	31,60a	12,41ab	1,04a
S3	75:00:25	51,27bc	24,83ab	17,52a	32,00a	13,40a	1,24a
S4	50:25:25	57,26abc	23,17ab	14,58a	38,30a	11,05abc	1,19a
S5	25:50:25	70,25abc	35,99a	17,69a	42,29a	9,33abc	1,19a
S6	25:25:50	89,62a	34,55a	20,84a	44,36a	9,84abc	1,16a
S7	00:50:50	58,18abc	29,85ab	14,68a	20,68a	2,63bc	2,01a
S8	00:75:25	56,08abc	23,81ab	18,95a	29,29a	8,83abc	1,55a
S9	00:25:75	80,35ab	31,80ab	19,94a	30,76a	2,64c	1,66a
Sub.	SC:CP:CA (%)	Raiz					
S1	100:00:00	43,37de	24,50a	9,99ab	12,17abc	9,35a	1,87a
S2	75:25:00	41,36e	21,56ab	10,20ab	10,84bc	7,31ab	1,36ab
S3	75:00:25	59,60bc	23,57ab	12,77a	12,43abc	9,20a	1,34ab
S4	50:25:25	46,45cde	20,74ab	9,91ab	12,98abc	7,53ab	0,58cd
S5	25:50:25	55,15bcd	21,86ab	10,58ab	16,42ab	7,73a	1,11bc
S6	25:25:50	87,54a	28,99a	15,31a	15,66a	8,05a	1,16bc
S7	00:50:50	62,26b	21,14ab	10,47ab	15,40a	3,07c	0,69cd
S8	00:75:25	58,00bcd	15,88b	7,55b	9,07c	4,39bc	0,20d
S9	00:25:75	71,71ab	20,48ab	7,87b	10,54bc	2,52c	0,22d

Legenda: SC – substrato comercial; CP – composto de poda; CA – composto de alimentos; Valores seguidos de letras diferentes na linha, diferem entre si (p<0,05), pelo teste de Kruskal-Wallis.

4. DISCUSSÃO

Os resultados demonstram que as formulações com os três componentes associados, de forma geral, proporcionaram maior crescimento, produção de biomassa, qualidade das mudas de *T. aurea* (Tabela 4), bem como a diminuição da quantidade de substrato comercial empregada na formulação. Aos 270 dias, apenas as mudas produzidas no substrato S8 (75 CP:25 CA), não atingiram altura mínima de 20 cm para plantio em campo (Gonçalves et al., 2000), sendo também significativamente menor para o diâmetro de coleto (Tabela 4). Em estudos sobre efeitos de substratos e recipientes na qualidade das mudas de *Tabebuia aurea*, Pinto et al. (2020), aos 120 dias observaram altura das mudas produzidas nos tubetes (280 cm³) variando de 13 a 24 cm, enquanto para os vasos (1800 cm³) as alturas variaram de 22 a 36 cm. As maiores alturas utilizaram formulações com solo + composto de resíduos vegetais para o tubete, e solo + esterco bovino para o vaso, respectivamente. Para a variável diâmetro de coleto, os autores só observaram diferença para as mudas produzidas nos vasos, aos 120 dias, variando de 4,33 a 7,50 mm, sendo as composições: solo + esterco bovino, solo + esterco equino, solo + pó de coco, solo + composto de resíduos vegetais + pó de coco, solo + esterco bovino + pó de coco e solo + esterco equino + pó de coco, responsáveis pelos maiores diâmetros. Os valores de H e DC observados por Pinto et al. (2020) para mudas em ambos os recipientes, são próximos aos determinados nesse estudo, porém, em menos tempo de produção, em que os autores atribuíram o rápido crescimento aos altos teores de nutrientes contidos nos estercos acrescentados as misturas.

Analizando o crescimento de craibeira (*Tabebuia aurea*) em diferentes substratos, Freire et al. (2015), determinaram aos 120 dias de produção das mudas em tubetes (280 cm³), alturas de 18,32 a 24,98 cm, sendo a maior altura significativa referente ao substrato contendo solo + esterco bovino, já a contribuição para crescimento do coleto, as formulações solo + esterco bovino, solo + esterco caprino e solo + esterco ovino contribuíram para os maiores diâmetros (3,08, 2,96 e 2,90, respectivamente). Já Dantas et al. (2018), avaliando a qualidade de mudas de *Tabebuia aurea* em dois ambientes e diferentes níveis de fertirrigação, determinaram aos 60 dias de condução do experimento, altura de 35,80 cm e diâmetro de 11,7 mm, para as mudas produzidas em vasos utilizando apenas solo (Argissolo) como substrato.

Realizando trabalho sobre compostos orgânicos como substratos na formação de mudas de Ipê-amarelo (*Tabebuia chrysotricha*) irrigadas com água residuária, Muraishi et al. (2010) aos 84 dias de desenvolvimento, observaram as maiores alturas nas formulações 4 e 5, sem substrato comercial, sendo substrato 4: 10% de composto de lixo + 90% de composto de poda, e substrato 5: 20% de composto de lixo + 80% de composto de poda. Em relação ao diâmetro de coleto, os autores observaram menores valores apenas no substrato comercial e para formulação 3 (5% composto de lixo e 95% composto de poda). Para ambas as variáveis analisadas, os autores verificaram no substrato comercial as menores médias significativas, atribuindo a maior quantidade de nutrientes presente nos compostos ainda acrescidos dos nutrientes da água residuária da estação de esgoto. Os diversos estudos demonstram a eficiência dos substratos formulados com diferentes resíduos orgânicos, em detrimento aos substratos comerciais testados.

Através da análise da Figura 3, por meio de análise visual, é possível perceber a diferença de desenvolvimento das raízes em função do substrato, entretanto a Figura 4, evidencia raízes mortas em processo de decomposição quando retiradas dos tubetes. Possivelmente, o período de desenvolvimento das mudas (270 dias) foi demasiadamente longo para o recipiente utilizado, e as raízes com maior desenvolvimento ocuparam todo o espaço do tubete, bloqueando a entrada de água e da fertirrigação, funcionando como uma barreira física ao crescimento das raízes, além de ter havido a utilização de todo o substrato no recipiente contribuindo para uma menor absorção de nutrientes e restringindo o desenvolvimento da raiz.

Não foram encontrados, na literatura, trabalhos para espécie *T. aurea* com duração acima de 150 dias em tubetes, e geralmente, em grande parte dos estudos as mudas produzidas em sacos plásticos são maiores como observado nos estudos de Dantas et al. (2018) e Pinto et al. (2020). Destaca-se que, o longo período de desenvolvimento do experimento, foi em decorrência da necessária paralisação de todas as atividades no ano de 2020 devido a pandemia de Covid-19, em que, as mudas foram encaminhadas para as análises destrutivas e laboratoriais assim que as atividades presenciais foram autorizadas a retornar.

Considerando que um maior desenvolvimento das raízes promove maior exploração do substrato e maior absorção de água e nutrientes, consequentemente um melhor desenvolvimento das mudas (Resende et al., 1995). Entende-se que, provavelmente os tratamentos que apresentaram limitação no desenvolvimento das raízes podem estar com resultados subestimados, pois as mudas atingiram seu ápice de desenvolvimento no tubete de 280 cm³ e transcorrido essa idade, começaram a fenecer.

Com relação as variáveis de massa de matéria seca (MSPA, MSR e MST), nota-se comportamento similar entre os compartimentos (parte aérea e raiz), Tabela 4, com a formulação S4 (50:25:25) proporcionando os maiores valores médios, numericamente, corroborando com as variáveis H e DC. Segundo Leite et al. (2017), a MST aumenta proporcionalmente ao IQD. Já que o IQD, considera em seu cálculo a robustez (relação H/DC) e o equilíbrio da distribuição da biomassa na muda (MST e relação MSPA/MSR) (Caldeira et al., 2008).

O comportamento sugerido por Leite et al., (2017), pode ser observado nesse estudo, já que as mudas produzidas no substrato S8 (0:75:25) apresentaram um alto IQD (2,89), porém, este não refletiu numa muda de qualidade no tocante aos parâmetros utilizados para o estabelecimento do que é considerado uma muda de qualidade para restauração florestal. Foram registradas para as mudas do substrato S8 a menor média de altura (14,6 cm) e coleto (5,9 mm) aos 270 dias de idade, característico de mudas pequenas com desenvolvimento lento, mas com a MSR alta (5,07 g) e MST média (8,46 g), ou seja, com as características em desequilíbrio e evidenciando a importância da MSR e MST para determinação do IQD. Ao passo que, nas mudas produzidas no substrato S4 (50:25:25), determinou-se IQD de 2,90, valor significativamente ($p < 0,05$) igual a S8, essas possuem as maiores médias de H (31,2 cm), DC (8 mm), MSR (6,85 g) e MST (14,45 g) sendo mudas que apresentam uma boa distribuição dos parâmetros e com padrão para utilização em projetos de restauração florestal. A gramatura da MSR em S8, pode ser um indicativo do comprometimento das mudas desse substrato em função do recipiente, já que o desenvolvimento radicular limitado influencia diretamente na emissão de novas folhas e crescimento em altura (Tabela 5).

Valores de IQD inferiores aos observados nesse estudo foram verificados por Pinto et al. (2020) nas mudas de *T. aurea*, sendo que os autores aos 120 dias constataram valores de IQD variando de 0,18 a 0,46 para mudas em tubetes, e IQD de 0,59 a 1,75 para mudas produzidas em vasos, sendo o maior valor, em ambos os recipientes, referente ao substrato 75% solo e 25% esterco equino. Em outro estudo, Freire et al. (2015), observaram o maior valor de IQD (1,14) nas mudas de *T. aurea* produzidas em solo + esterco bovino. Enquanto, Dantas et al. (2018), verificaram valores de IQD de 4,61 para as mudas de *T. aurea* produzidas em vasos com solo, aplicando solução nutritiva na concentração de 72%.

Analisando, os valores médios de IQD, verifica-se, de forma geral, que as composições formuladas com substrato comercial associado ao composto de poda arbórea, foram os tratamentos que proporcionaram os maiores valores médios para as variáveis crescimento e qualidade analisados, sendo eles S4, S2 e S5, como pode ser observado nas Tabelas 4 e Figura 2. Em contrapartida, a composição (S1) testemunha e as composições com adição do composto de comida (S3, S6 e S9) e a composição S5 (25:50:25) foram os tratamentos com que propiciaram a melhor nutrição das mudas (Tabela 5).

5. CONCLUSÕES

Os resíduos sólidos orgânicos urbanos podem ser utilizados na composição de substratos. A adição dos compostos orgânicos de poda e de alimentos para a confecção dos substratos, proporcionaram maior crescimento e qualidade das mudas de *Tabebuia aurea*, e diminui a necessidade de uso do substrato comercial.

Considerando todos os parâmetros avaliados, as mudas produzidas nos substratos compostos por 75% substrato comercial + 25% composto de poda; 50% substrato comercial + 25% composto de poda + 25% composto de comida; e 50% composto de poda + 50% composto de comida, atingiram qualidade suficiente para plantio em campo.

Os resultados demonstram não ser indicado produzir a espécie *Tabebuia aurea* em tubetes de 280 cm³ por períodos maiores que 150 dias, pois a espécie possui sistema radicular do tipo pivotante, desenvolvendo-se mais rápido do que a parte aérea na fase de muda.

O excessivo tempo de permanência da muda no recipiente, influenciou em seu desenvolvimento, desta forma faz-se necessário a realização de novos testes com os compostos orgânicos em diferentes recipientes e períodos de produção.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. Meteorologische Zeitschrift, Berlin, v. 22, p. 711-728, 2013.
- ASSOCIAÇÃO DE MUNICÍPIOS COVA DA BEIRA (AMCB). Central de Compostagem, 2006. [Online]. Disponível em < <http://www.amcb.pt/> >.
- ARAÚJO, Y. R. V., DE GÓIS, M. L., JUNIOR, L. M. C., & CARVALHO, M. Carbon footprint associated with four disposal scenarios for urban pruning waste. Environmental Science and Pollution Research, v. 25, p. 1863-1868, 2018.
- ARAÚJO, E. F., AGUIAR, A. S., DE SANTANA ARAUCO, A. M., DE OLIVEIRA GONÇALVES, E., & DE ALMEIDA, K. N. S. Crescimento e qualidade de mudas de paricá produzidas em substratos à base de resíduos orgânicos. Nativa, v. 5, n. 1, p. 16-23, 2017.
- AWASTHI, A. K. et al. Zero waste approach towards a sustainable waste management. Resources, Environment and Sustainability, v. 3, p. 100014, 2021.
- CALDEIRA, M. V. W.; ROSA, G. N.; FENILLI, T. A. B.; HARBS, R. M. P. Composto orgânico na produção de mudas de aroeira-vermelha. Scientia Agraria, v. 9, p. 27 – 33, 2008.
- CUNHA, F. L., SILVA, O. M. D. C., ARAUJO, V. C. D., VENTURIN, N., & MELO, L. A. D. Palha de café carbonizada em substratos renováveis para produção de mudas de Eucalyptus urophylla e Anadenanthera macrocarpa. Ciência Florestal, v. 32, p. 548-572, 2022.
- DANTAS, R. D. P., OLIVEIRA, F. D. A. D., CAVALCANTE, A. L. G., PEREIRA, K. T. O., OLIVEIRA, M. K. T. D., & MEDEIROS, J. F. D. Qualidade de mudas de *Tabebuia aurea* (Manso) Benth. & Hook. em dois ambientes e diferentes níveis de fertirrigação. Ciência Florestal, v. 28, p. 1253-1262, 2018.
- DICKSON, A.; LEAF, A.; HOSNER, J. F. Quality appraisal of white spruce and white pine seedling stock in nurseries. Forestry chronicle, Ottawa, v.36, p. 10-13, 1960.
- EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA E AGROPECUÁRIA. LANA, M. M. e PROENÇA, L. C. Resíduos orgânicos. Hortaliça não é só salada. Ago. 2021. Disponível em: <[https://www.embrapa.br/hortaliça-nao-e-so-salada/secoes/residuos-organicos#:~:text=No%20Brasil%2C%20os%20res%C3%ADduos%20org%C3%A2nicos,e%20os%20rejeitos%20\(22%20%25\).](https://www.embrapa.br/hortaliça-nao-e-so-salada/secoes/residuos-organicos#:~:text=No%20Brasil%2C%20os%20res%C3%ADduos%20org%C3%A2nicos,e%20os%20rejeitos%20(22%20%25).>)>. Acesso em: 27/02/2023.

FREIRE, A. L. O., RAMOS, F. R., GOMES, A. D. V., SANTOS, A. S., ALVES, F. L. M., & ARRIEL, E. F. Crescimento de mudas de craibeira (*Tabebuia aurea* (Manso) Benth. & Hook) em diferentes substratos. *Agropecuária Científica no Semiárido*, v. 11, n. 3, p. 38-45, 2015.

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

GONÇALVES, J. L. M.; SANTARELLI, E. D.; NETO, S. P. M.; MANARA, M. P. Produção de mudas de espécies nativas: substrato, nutrição, sombreamento e fertilização. In: GONÇALVES, J. L. M.; BENEDETTI, V. (Ed.). *Nutrição e fertilização florestal*. Piracicaba: IPEF, 2000. p.309-350.

KRATZ, D., WENDLING, I., NOGUEIRA, A. C., & SOUZA, P. V. D. Propriedades físicas e químicas de substratos renováveis. *Revista Árvore*, v. 37, p. 1103-1113, 2013.

LEITE, T. D. S., DOMBROSKI, J. L. D., FREITAS, R. M. O. D., LEITE, M. D. S., & RODRIGUES, M. R. D. O. Produção de mudas de *Enterolobium contortisiliquum* e partição de assimilados em resposta à adubação fosfatada e inoculação com fungos micorrízicos. *Ciência Florestal*, v. 27, p. 1157-1166, 2017.

LOHMANN, L.G. *Tabebuia* in Flora e Funga do Brasil. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <<https://floradobrasil.jbrj.gov.br/FB114257>>. Acesso em: 04 mar. 2023

LORENZI, H. Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas do Brasil. Vol. 1. 2 ed. Nova Odessa: Editora Plantarum, 1998. 368 p.

MELO, L. A. de et al. Qualidade e crescimento inicial de mudas de *Mimosa caesalpiniiifolia* Benth. Produzidas em diferentes volumes de recipientes. *Ciência Florestal*, Santa Maria v. 28, n. 1, p. 47-55, jan. – mar., 2018. DOI: 10.5902/1980509831574. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1980509831574>.

MENDONÇA, V. M. M., SILVA, V. D. S., BEUTLER, S. J., TAVARES, O. C. H., GARCIA, A. C., & PEREIRA, M. G. Characterization of organic compost from urban pruning waste. *Research, Society and Development*, v. 10, n. 6, e38110615830- e38110615830, 2021.

MURAISHI, R. I., GALBIATTI, J. A., NOBILE, F. O. D., & BARBOSA, J. C. COMPOSTOS orgânicos como substratos na formação de mudas de ipê-amarelo (*Tabebuia chrysotricha* (Mart. Ex. Dc.) standl) irrigadas com água residuária. *Engenharia Agrícola*, v. 30, p. 1081-1088, 2010.

NOCCHI, S. R. *et al.* Pharmacological properties of specioside from the stem bark of *Tabebuia aurea*. *Revista Brasileira de Farmacognosia*, v. 30, n. 1, p. 118-122, 2020.

OLIVEIRA, M. de S. de; CONCEIÇÃO, D. T.; LIMA, K. E. M. E. Método de compostagem rápida: aplicação na gestão de resíduos no alojamento masculino da UFRRJ - Seropédica. *Cadernos de Agroecologia*, v. 15, n. 2, 2020. Disponível em: <https://cadernos.aba-agroecologia.org.br/cadernos/article/view/4601>.

ONU. ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. 2015. Disponível em: <https://www.undp.org/content/dam/brazil/docs/agenda2030/undp-br-Agenda2030-completo-pt-br-2016.pdf>.

PERUSSI, G., DE FREITAS NETO, J. J., SANTOS, I. P., DA SILVA, J. M. S., & PIÑA-RODRIGUES, F. C. M. Potencial produtivo de sementes florestais nativas para a restauração florestal da Bacia do Rio Doce. *Conjecturas*, v. 22, n. 16, p. 376-390, 2022.

PINTO, A. V. F., ALMEIDA, C. C. S., BARRETO, T. N. A., SILVA, W. B., & PIMENTEL, D. J. O. Efeitos de substratos e recipientes na qualidade das mudas de *Tabebuia aurea* (Silva Manso) Benth. & Hook. F. Ex S. Moore. *Pesquisa Florestal em Foco*. [recurso eletrônico] / Organizadores Maria José de Holanda Leite... [et al.]. – Nova Xavantina, MT: Pantanal Editora, 2020. 105p.

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A. Análise de solo, plantas e outros materiais. 2. Ed. Porto Alegre: Departamento de Solos, UFRGS, p. 177-188. 1995.

USEPA. (1996). Digestão ácida de sedimentos, lamas e solos – método EPA 3050B. Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos. Recuperado em 27 de outubro de 2021, de <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-06/documents/epa-3050b.pdf>

VIEIRA, C. R., DE ASSIS CARNEIRO, R. S., BOTELHO, R. A., & DA COSTA, P. P. Doses de esterco bovino e equino no crescimento inicial de mudas de ipê-branco. Revista Ecologia e Nutrição Florestal-ENFLO, v. 10, p. e03-e03, 2022.

CAPÍTULO II

CASCALHOS DE PERFURAÇÃO PROVENIENTES DA EXPLORAÇÃO DE PETRÓLEO MELHORAM PROPRIEDADES DO SUBSTRATO E CRESCIMENTO DE MUDAS DE IPÊ-BRANCO (*Tabebuia roseoalba*)

RESUMO

São necessárias mais informações sobre o potencial de uso cascalhos de perfuração (rochas britadas) da indústria petrolífera na agricultura e silvicultura. Foi realizado um experimento em viveiro florestal para avaliar a influência de substratos formulados a partir de brita terrestre nas características de mudas de ipê-branco (*Tabebuia roseoalba*) (ou seja, crescimento, qualidade e nutrição). Foram utilizadas cinco proporções gravimétricas de cascalho de perfuração misturado com substrato comercial casca de Pinus (Mecplant ® Florestal 3): controle apenas com substrato comercial e cascalho zero (G0), 2,5% cascalho (G2,5), 5% cascalho (G5), 7,5% de cascalho (G7,5) e 10% de cascalho (G10). Em geral, a alta proporção de cascalhos de perfuração aumenta a densidade e diminui a umidade atual e a porosidade total dos substratos formulados. As proporções de cascalhos de perfuração G2,5, G5 e G7,5 contribuíram significativamente com a água disponível e água facilmente disponível nesses substratos com valores percentuais variando de 23% a 30% maiores que o substrato G10. Em geral, o aumento da proporção de cascalho resultou em aumento dos teores de pH, P, Na, K e metais (Cu, Fe, Ni, Mn, Cd, Zn, Cr e Pb), com exceção dos nutrientes Ca e Mg que diminuíram. A concentração de metais pesados em todos os substratos não ultrapassou os valores permitidos nas normas legais. Os substratos G2,5 e G5 aumentaram em aproximadamente 20% o diâmetro do caule e a altura das mudas, e a proporção G2,5% também afetou a massa seca das raízes e o índice de qualidade de Dickson, com valores duas vezes superiores ao substrato G0. A análise multivariada mostrou-se adequada como abordagem complementar para avaliação da qualidade das mudas. A adição de estacas perfuradas, em geral, aumentou o acúmulo de nutrientes e metais pesados das mudas de ipê-branco, sendo que o substrato G5 proporcionou o maior acúmulo dos nutrientes P, Ca, Pb e Zn na parte aérea, enquanto a proporção G2,5 contribuiu com maior acúmulo de N, Ca, Fe, Cr, Mn e Pb na raiz. Os resultados deste estudo sugerem que a adição de estacas de broca como componente condicionante do substrato nas proporções de 2,5% e 5% é uma alternativa viável para aproveitamento desse resíduo na produção de mudas de *Tabebuia roseoalba* de alta qualidade.

Palavras-chave: Cascalho *onshore*, Espécies nativas, Crescimento de mudas, Macro e micronutrientes, Restauração florestal.

ABSTRACT

More information is needed on the potential of using drill cuttings (crushed rocks) from oil industry in agriculture and forestry. An experiment in forest nursery was carried out to evaluate the influence of substrates formulated from onshore gravel on characteristics of ipê-branco (*Tabebuia roseoalba*) seedlings (i.e., growth, quality, and nutrition). We used five gravimetric proportions of gravel from drill cuttings mixed with Pinus-bark commercial substrate (Mecplant® Florestal 3): control with only commercial substrate and zero gravel (G0), 2.5% gravel (G2.5), 5% gravel (G5), 7.5% gravel (G7.5), and 10% gravel (G10). In general, high proportion of drill cuttings increase density and decrease current moisture and total porosity of the formulated substrates. The drill cuttings proportions G2.5, G5 and G7.5 significantly contributed with the available water and readily available water in these substrates with percentage values range 23% - 30% higher than G10 substrate. In general, increasing the gravel proportion resulted in increased levels of pH, P, Na, K and metals (Cu, Fe, Ni, Mn, Cd, Zn, Cr and Pb), except for Ca and Mg nutrients that decreased. The concentration of heavy metals in all substrates did not exceed the permissible values in legal standards. The G2.5 and G5 substrates increased in 20% approximately the stem diameter and height of seedlings, and G2.5% proportion also affected the root dry mass and Dickson quality index, with values two times higher than G0 substrate. The multivariate analysis proved suitable as a complementary approach to evaluate the seedlings' quality. The drilling cuttings addition, in general, increased the accumulation of nutrients and heavy metals of the ipê-branco seedlings, and G5 substrate provided the greatest accumulation of the nutrients P, Ca, Pb and Zn in shoot, while G2.5 proportion contributed with higher accumulation of N, Ca, Fe, Cr, Mn and Pb in root. The results of this study suggest that the addition of drill cuttings as a conditioning component of the substrate at 2.5% and 5% proportions is a viable alternative for using this residue to produce *Tabebuia roseoalba* seedlings of high quality.

Keywords: Onshore gravel, Native species, Seedlings Growth, Macro and micronutrients, Forest restoration.

1. INTRODUÇÃO

A indústria petrolífera brasileira produz 2,9 milhões de barris de petróleo diariamente (ANP, 2021) e enfrenta desafios importantes na gestão dos impactos ambientais causados pelas atividades associadas de exploração e refino. Um dos principais desafios é a gestão dos cascalhos de perfuração, que são de composição diversa, têm alto potencial de poluição ambiental e são produzidos em grandes volumes (IOGP, 2016; Almeida et al., 2017; Almeida et al., 2021), todos fatores que dificultam a sua correta disposição final.

O cascalho de perfuração é um resíduo proveniente da abertura de poços de petróleo (Ribeiro et al., 2022), podendo apresentar granulometria variável (fina a grossa). É composto por calcário, argila, ferro, alumínio, arenito e outros tipos de materiais, além de sódio, metais e outros constituintes encontrados no fluido de perfuração (IOGP, 2016; Ribeiro et al., 2022), e pode causar diversos danos ambientais se não forem adequadamente geridos.

A disposição final dos resíduos é uma das principais dificuldades enfrentadas pelas indústrias petrolíferas, pois requerem maiores investimentos financeiros e diferentes técnicas para sua neutralização. Os destinos atuais do cascalho de perfuração, como a incineração e incorporação no solo, não neutralizam completamente os danos ambientais (Almeida et al., 2017; Njuguna et al., 2022). Portanto, diversos estudos têm explorado o uso do cascalho na produção de concreto, formulação de fertilizante organomineral, condicionador de solo e outras finalidades (Bandeira, 2019; Ribeiro et al., 2022). No entanto, ainda são necessárias alternativas mais ecológicas e sustentáveis que reduzam os custos de eliminação e contribuam para o crescimento das plantas.

A utilização de resíduos orgânicos, agrícolas e industriais tem se tornado cada vez mais comum na formulação de substratos para produção de mudas florestais (Abreu et al., 2019; Araújo et al., 2020; Silva et al., 2021; Cunha et al., 2022). Pois são materiais gerados em grandes quantidades, têm baixo custo e podem ser fontes naturais de nutrientes, contribuindo para o desenvolvimento de mudas florestais em viveiros, uma vez que o crescimento das plantas depende da qualidade do substrato utilizado, associado ao manejo empregado. Porém, para que um substrato tenha boa qualidade, suas características físicas e químicas devem ser adequadas, o que exige o estudo das combinações dos componentes utilizados (Kratz, 2013; Kratz e Wendling, 2016; Mendonça et al., 2021), para que o as necessidades das mudas sejam atendidas. Considerando isso, utilizar o cascalho como componente do substrato para produção de mudas pode ser uma estratégia que concilia o descarte de resíduos, transformando-o em insumo agrícola e melhorando a qualidade das mudas. Apesar do potencial uso do cascalho como componente de substrato, ainda faltam estudos sobre o tema.

Nos últimos anos, devido à necessidade de restauração dos ecossistemas, vários acordos ambientais internacionais foram estabelecidos. Por exemplo, foram acordados 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) para consolidar a agenda 2030 com foco na conservação e proteção ambiental (ONU, 2015). Mais recentemente, foi feito um acordo para restaurar 500 milhões de hectares no planeta até 2050, estabelecido pelas Nações Unidas (PNUMA, 2019). No Brasil, principalmente nas regiões de Mata Atlântica, existe outra iniciativa denominada Pacto Pela Mata Atlântica, que visa restaurar 15 milhões de hectares até 2050. Apesar dessas iniciativas, o Brasil ainda enfrenta um descompasso entre a produção de insumos e a demanda por restauração, variando desde a quantidade de insumos necessários até seu tempo de produção e disponibilidade (Perussi et al., 2022). Há uma escassez significativa e crescente de mudas florestais de qualidade para atender às demandas de diversos projetos do setor florestal, o que está associado à falta de insumos.

O ipê-branco (*Tabebuia roseoalba*) (Ridl.) Sandwith (Bignoniaceae) é uma espécie arbórea nativa da América do Sul, ameaçada de extinção, ocorrendo na Mata Atlântica e no Cerrado (Feres et al., 2012). Esta espécie possui tronco reto e pode crescer entre 7 e 16 metros de altura e diâmetro de 40 a 50 cm. A madeira possui densidade básica média, sendo indicada

para uso na construção civil, principalmente para acabamentos internos. Também é utilizada para ornamentação devido ao seu período de floração (agosto a outubro) e é utilizada em projetos de reflorestamento devido à sua capacidade de adaptação a ambientes secos e pedregosos (Lorenzi, 2022). Porém, as sementes desta espécie são ortodoxas e possuem qualidade de armazenamento variada e baixa viabilidade, o que dificulta a dispersão natural e as técnicas de produção de mudas (Abbate e Takaki, 2014).

Atendendo à necessidade de produção de mudas de qualidade e ao potencial uso de cascalho de perfuração em formulações de substratos, este estudo teve como objetivo (i) analisar as propriedades físicas e químicas de substratos formulados com proporções variadas de cascalho *onshore*; (ii) avaliar os efeitos de substratos formulados com cascalho no crescimento e qualidade das mudas; e (iii) avaliar a contribuição dos substratos para o acúmulo de macro e micronutrientes em diferentes compartimentos de mudas de espécies florestais.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de estudo e Delineamento experimental

O estudo foi realizado em um viveiro florestal no município de Seropédica, Rio de Janeiro, Brasil, entre fevereiro e outubro de 2020. O clima da região é classificado como tipo Aw segundo a classificação de Köppen, caracterizado como tropical com verões chuvosos e invernos secos (Alvares et al., 2013). A área recebe precipitação média anual de 1.245 mm sem estação seca definida e tem temperatura média anual de 23,7°C (Melo et al., 2018).

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado com cinco tratamentos. Os tratamentos consistiram em substratos com diferentes proporções de cascalho (C) proveniente de cascalho misturado com substrato comercial Mecplant (casca de pinus bioestabilizada) (SC), sendo eles: C0: controle apenas com substrato comercial e zero cascalho, C2,5: 2,5% cascalho, C5 : 5% cascalho, C7,5: 7,5% cascalho e C10: 10% cascalho. Os substratos de cada tratamento foram homogeneizados em betoneira e posteriormente foram retiradas três amostras para determinação dos atributos químicos e físicos de cada substrato formulado.

O cascalho *onshore* foi fornecido pela Petróleo Brasileiro SA. (Petrobras), proveniente de uma mistura proporcional de todas as fases de perfuração de dois poços - um na Unidade Operacional Bahia (UOBA), do poço 7-MGP-98D-BA, e outro na Unidade Operacional Sergipe e Alagoas (UOSEAL), do poço 7-MGP-98D-BA, e outro na Unidade Operacional Sergipe e Alagoas (UOSEAL), do poço 7-SMC-50D-AL. O substrato comercial (SC) Mecplant® Florestal 3 foi produzido a partir da compostagem da casca de *Pinus* spp., amplamente utilizada na produção de mudas arbóreas (Tabela 1).

Foram produzidas quinze mudas de ipê-branco (*Tabebuia roseoalba*) por tratamento, em tubetes de polipropileno (280 cm³), colocados em canteiros a pleno sol. As sementes foram previamente lavadas, semeadas em canteiros preenchidos com areia lavada, em janeiro de 2020, e 15 dias após a emergência foram transplantadas para os tubetes. Durante o experimento, as mudas foram irrigadas duas vezes ao dia por meio de sistema de microaspersão, no início da manhã e no final da tarde, ou conforme necessidade com base na análise visual. Além disso, foram analisados quanto à ocorrência de doenças, ataques de pragas e surgimento de plantas invasoras, que foram retiradas dos tubetes. A partir dos 120 dias após o transplante, as adubações foram realizadas quinzenalmente, alternando entre KCl (cloreto de potássio) e (NH₄)₂SO₄ (sulfato de amônio) na proporção de 260 g e 1000 g por 100 L de água, respectivamente. Foram adicionados 5 g L⁻¹ de fertilizante encapsulado de liberação lenta (NPK 14-14-14) em todos os substratos antes do início da produção.

2.2. Caracterização física e química dos substratos

Foram determinados os seguintes atributos físicos dos substratos formulados (tratamentos): densidade úmida (DU) e densidade seca (DS), e a umidade atual (UA) pela diferença da massa úmida e seca, após atingir peso constante na estufa a 65°C por 72h. Essas variáveis foram determinadas pelo método de autocompactação, no qual uma proveta graduada de 500 mL foi preenchida até aproximadamente a marca de 300 mL com o substrato em sua umidade atual. O cilindro foi então largado, sob ação da própria massa, de uma altura de 10 cm por 10 (dez) vezes consecutivas. Com auxílio de uma espátula, levemente nivelado com a superfície, foi lido o volume (mL) e calculados os valores de densidade úmida e seca, e umidade atual.

A curva de retenção de água composta pelas variáveis: porosidade total (PT), espaço de aeração (EA), água disponível (AD), água prontamente disponível (AFD), água tamponante (AT), água remanescente (AR) e capacidade de retenção de água em Tensão de 10 cm (CRA10). Determinamos essas variáveis por meio de curvas de retenção de água nas tensões de 0, 10, 50 e 100 cm de altura da coluna d'água, correspondentes às pressões de 0, 10, 50 e 100 hPa (De Boodt & Verdonck, 1972). Funis de Büchner com placas porosas (1/2 bar) foram utilizados como mesa de tensão (Kiehl, 1979). O fundo dos anéis metálicos foi vedado com tecido de náilon preso por um laço de borracha e os anéis com capacidade de 68,7 mL foram pesados. Depois disso os anéis foram preenchidos com o substrato. A quantidade de substrato foi calculada com base em sua densidade, para garantir uniformidade de volume e foram colocados em bandejas plásticas com água até 1/3 de sua altura, para saturá-los, por 24 horas, e em seguida os anéis foram retirados da água e pesados. O volume de água contido na amostra neste ponto corresponde à porosidade total no ponto zero de tensão (0 hPa). Os anéis foram transferidos para o funil, previamente ajustado à tensão de 10 cm de coluna d'água, e permanecem no funil até atingir o equilíbrio (em torno de 48 horas), e em seguida foram secos em estufa a 105°C até atingir peso constante. Os mesmos procedimentos foram realizados para as alturas de coluna d'água de 50 e 100 cm. Em cada procedimento foram determinados o teor de umidade e o peso de matéria seca.

As curvas de retenção de água foram construídas a partir dos valores de umidade volumétrica obtidos a partir dos percentuais de água retida para cada tensão, em que a porosidade total (PT) corresponde à umidade volumétrica presente nas amostras saturadas (0 hPa); o espaço de aeração (EA) foi determinado pela diferença entre a porosidade total e a umidade volumétrica na coluna de água de 10 cm (10 hPa); água facilmente disponível (AFD) corresponde ao volume de água encontrado entre 10 e 50 cm de coluna d'água (10 e 50 hPa); água tamponante (AT) é a água volumétrica liberada entre 50 e 100 cm de coluna d'água (50 e 100 hPa); água disponível (AD) refere-se ao volume de água liberado entre 10 e 100 cm de coluna d'água (10 e 100 hPa); água remanescente (AR) foi o volume de água presente na amostra após ser submetida à pressão de sucção de 100 hPa; e a capacidade de retenção de água a 10 cm (CRA10) foi a quantidade de água retida pelo substrato após ser submetido a 10 cm de coluna d'água ou 10 hPa.

Os atributos químicos determinados foram: pH e condutividade elétrica (CE), e físicos (UA, DU, DS, PT, EA e CRA10) de acordo com as Instruções Normativas Brasileiras nº 17 (BRASIL, 2007), nº 31 (BRASIL, 2008) e os métodos estabelecidos por Kiehl (1979), bem como os níveis de elementos químicos (Tedesco et al., 1995; USEPA, 1998). Quanto à caracterização química, a concentração de nitrogênio (N) foi determinada pelo método de destilação do extrato (destilador Kjeldahl); fósforo (P) por espectrofotometria com adição de molibdato de amônio e ácido aminonaftolsulfônico; as concentrações de cálcio (Ca), magnésio (Mg), ferro (Fe), cobre (Cu), manganês (Mn), zinco (Zn), chumbo (Pb), cádmio (Cd), níquel (Ni) e cromo (Cr) por espectrofotometria de absorção atômica; e sódio (Na) e potássio (K) por fotometria de chama (Tedesco et al, 1995; USEPA, 1998) (Tabela 1). Os valores de potencial

de hidrogênio (pH) e condutividade elétrica (CE) também foram determinados em diluição substrato: água de 1:5 (v:v) em medidor de pH e condutivímetro.

Tabela 1. Caracterização química do cascalho de perfuração (C) e do substrato comercial (SC), utilizados na formulação dos substratos.

Componente	pH H ₂ O	N	P	K	Ca	Mg	Na	Fe
-----g kg ⁻¹ -----								
C	6.8	4.11	10.22	59.74	15.3	4.36	4.5	5.40
SC	4.5	22.09	0.22	20.6	25.4	40.36	0.11	3.90
Componente	pH H ₂ O	Cd	Cu	Pb	Mn	Ni	Cr	Zn
-----mg kg ⁻¹ -----								
C	6.8	ND	14.53	0.99	205.08	2.96	4.53	147.77
SC	4.5	0.15	13.1	ND	152.2	33.1	15.23	24.8

Legenda: pH: potencial hidrogeniônico (pH-metro); N: nitrogênio (destilação de extrato); P: fósforo (espectrofotometria); Na: sódio e K: potássio (fotometria de chama); Ca: cálcio e Mg: magnésio; Cu: cobre; Fe: ferro; Ni: níquel; Mn: manganês; Cd: cádmio; Zn: zinco; e Cr: cromo (espectrofotometria de absorção atômica); ND: Não detectado. C – cascalho proveniente de perfuração *onshore*. SC – substrato comercial (Mecplant® Florestal 3, compondo a casca de *Pinus* spp.).

2.3. Crescimento, qualidade e nutrição das mudas

Para avaliar a qualidade e o desenvolvimento das mudas foram medidos: altura da parte aérea (H) com régua milimetrada e diâmetro do caule (DC) com paquímetro digital (resolução de 0,01 mm /0,0005”). As avaliações foram realizadas mensalmente aos 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210 e 240 dias após o transplante.

Aos 240 dias, medimos o teor de clorofila total das folhas utilizando um aparelho CloroFiloG – Falker. Em seguida, as mudas foram retiradas dos tubos e a área foliar foi medida por meio do aparelho LI-COR LI-3100-AREA METER, através das análises destrutivas. Dez mudas por tratamento foram selecionadas aleatoriamente para avaliar a qualidade e nutrição dos compartimentos aéreo e radicular. Para determinação da massa de matéria seca, as plântulas foram separadas em parte aérea (PA), composta por folhas, ramos e caules; e na raiz (R). Os compartimentos foram lavados em água corrente, colocados em sacos de papel e secos em estufa a 65°C por 72 horas, sob circulação forçada de ar. O material foi pesado para obtenção da massa seca da parte aérea (MSPA) e massa seca da raiz (MSR).

O Índice de Robustez foi calculado como a razão entre a altura do caule e o diâmetro do caule (H/DC) e posteriormente utilizado para calcular o Índice de Qualidade de Dickson (Dickson et al., 1960), conforme Equação 1:

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

Em que: IQD: índice de qualidade de Dickson; MST: massa seca total (g); H: altura das mudas (cm); DC: diâmetro do coleto (mm); MSPA: massa seca da parte aérea (folhas, ramo e coleto) (g); MSR: massa seca de raiz (g).

Amostras de parte aérea e raiz foram analisadas por espectrometria de absorção atômica (USEPA 3050B - USEPA, 1998) para determinação das concentrações de N (Tedesco et al.,

1995), P, K, Ca, Mg, Na, Cd, Cu, Pb, Mn, Ni, Cr, Zn e Fe, que foram obtidos. O acúmulo de cada um desses elementos na parte aérea e na raiz foi determinado pela relação entre a concentração de nutrientes e a massa seca de cada compartimento.

2.4. Análise de dados

Todos os procedimentos estatísticos foram realizados no *software* R (R Core Team, 2023). Os dados foram verificados quanto à distribuição normal dos resíduos pelo teste de Shapiro-Wilk ($p < 0,05$) e quanto à homogeneidade das variâncias pelo teste de Levene ($p < 0,05$). Posteriormente, foi realizada análise de variância (ANOVA) com nível de significância de 5%. Por fim, foi realizado o teste post-hoc de Tukey para comparações múltiplas para determinar as diferenças entre os tratamentos ($p < 0,05$). Análises não paramétricas (teste de Kruskal-Wallis com $p < 0,05$) foram utilizadas quando os dados não atenderam aos pressupostos da ANOVA (isto é, normalidade, homogeneidade).

Análises multivariadas foram realizadas nas variáveis morfológicas, incluindo H, DC, AF, MSPA, MSR e IQD, para agrupar observações e variáveis. Para garantir que os dados fossem adequados para análises multivariadas, foi utilizado o índice Kaiser, Meyer, Olkin (KMO), utilizando funções do pacote "*psych*" (Revelle, 2021). Foi realizada uma Análise de Componentes Principais (ACP) para reduzir a dimensionalidade dos dados e avaliar o agrupamento das variáveis. Além disso, foi realizada uma análise de agrupamento K-Means para avaliar o agrupamento das observações. Os resultados da Análise de Cluster foram plotados em um biplot ACP. Ambas as análises multivariadas utilizaram as funções R base (pacote "*stats*"). Além disso, foi utilizado o pacote "*factoextra*" (Kassambara e Mundt, 2020) para visualização dos resultados.

3. RESULTADOS

3.1. Características físicas e químicas dos substratos formulados

A adição do cascalho de perfuração alterou os parâmetros físicos e químicos dos substratos formulados e os resultados mostraram diferenças significativas entre os substratos (Tabelas 2 e 3). Os valores de densidade úmida (DU) e densidade seca (DS) aumentaram com o aumento da proporção de cascalho no substrato, sendo os maiores valores observados nas maiores proporções (C7,5 e C10) (Tabela 2). Os valores de umidade atual (UA) e porosidade total (PT) apresentaram resultados inversos, diminuindo com o aumento da proporção de cascalho (Tabela 2).

O espaço de aeração (EA) foi maior no substrato controle ($0,33 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), diminuindo com o aumento das proporções de cascalho até C7,5 ($0,19 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). Porém, para a proporção C10 foram observados valores elevados, sendo semelhantes ao C2,5 e C5, substratos nos quais foram utilizadas menores proporções de cascalho (Tabela 2).

Maiores valores de água disponível (AD) e água facilmente disponível (AFD) foram observados em C2,5, C5 e C7,5, enquanto o C10 apresentou os menores (Tabela 2). O substrato C2.5 apresentou maior água tamponante (AT) e G10 o menor, enquanto C0, C5 e C7.5 apresentaram valores intermediários (Tabela 2). Os valores de capacidade de retenção de água foram maiores nos substratos C2.5, C5 e C7.5, menores no C10 e intermediários no C0, não diferindo de C2.5 e C5 (Tabela 2).

Tabela 2. Média e erro padrão (entre parênteses) das propriedades físicas de substratos formulados com doses crescentes de cascalho *onshore*.

Propriedades Físicas		Substratos				
		C0	C2.5	C5	C7.5	C10
Densidade úmida	g cm ⁻³	0.50(±.004) _d	0.55(±.005) _c	0.56(±.002) _c	0.60(±.002) _b	0.64(±.007) _a
Densidade seca	g cm ⁻³	0.18(±.001) _e	0.24(±.003) _d	0.26(±.000) _c	0.31(±.002) _b	0.36(±.003) _a
Umidade atual	g g ⁻¹	0.64(±.001) _a	0.57(±.003) _b	0.54(±.001) _c	0.49(±.002) _d	0.45(±.001) _e
Porosidade total	m ³ m ⁻³	0.89(±.006) _a	0.87(±.002) _{ab}	0.85(±.005) _b	0.79(±.001) _c	0.78(±.010) _c
Espaço de aeração	m ³ m ⁻³	0.33(±.005) _a	0.28(±.011) _b	0.27(±.005) _b	0.19(±.005) _c	0.25(±.016) _b
Água disponível	m ³ m ⁻³	0.20(±.003) _{ab}	0.22(±.005) _a	0.22(±.006) _a	0.24(±.010) _a	0.17(±.010) _b
Água facilmente disponível	m ³ m ⁻³	0.17(±.003) _{ab}	0.18(±.005) _a	0.18(±.005) _a	0.19(±.007) _a	0.14(±.009) _b
Água tamponante	m ³ m ⁻³	0.03(±.000) _{ab}	0.04(±.002) _a	0.03(±.002) _{ab}	0.03(±.003) _{ab}	0.02(±.001) _b
Água remanescente	m ³ m ⁻³	0.36(±.001) _a	0.38(±.008) _a	0.37(±.005) _a	0.36(±.004) _a	0.36(±.003) _a
Capacidade de retenção de água 10	m ³ m ⁻³	0.57(±.002) _b	0.59(±.010) _{ab}	0.58(±.003) _{ab}	0.60(±.006) _a	0.53(±.008) _c

Legenda: Valores médios ± Erro padrão; Densidade úmida e densidade seca determinada pelo método de autocompactação; A umidade atual foi determinada em estufa até peso constante devido à diferença de massa; Porosidade total, espaço de aeração, água disponível, água facilmente disponível, água tamponante, água remanescente e capacidade de retenção de água na tensão de 10 cm determinada em funis de tensão. Legenda: C – cascalho proveniente de perfuração onshore. SC – substrato comercial. Em que: C0: 100% SC (controle); C2.5: 2,5% C; C5: 5% C; C7,5: 7,5% C; C10: 10% C. Médias seguidas de mesma letra na mesma linha e para a mesma variável não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5%.

As propriedades químicas também diferiram entre os substratos formulados ($p \leq 0,05$) (Tabela 3). O pH aumentou de 4,52 no substrato C0 para 6,53 no C10; e a condutividade elétrica de 0,48 em C0 a 1,03 mS cm⁻¹ no substrato C7.5 (Tabela 3). Em geral, o aumento da proporção de cascalho de C0 para C10 resultou em aumento dos teores de P, Na, K e metais (Cu, Fe, Ni, Mn, Cd, Zn, Cr, Pb) (Tabela 3). Por outro lado, o substrato controle apresentou os maiores teores de N e Ca, enquanto C5 e C10 os menores para N e Ca, respectivamente. A concentração de chumbo não foi detectada na maioria dos substratos, apenas no substrato C10 (Tabela 3).

Tabela 3. Média e erro padrão (entre parênteses) das propriedades químicas dos substratos com doses crescentes de cascalho *onshore*.

Propriedades Químicas		Substratos				
		C0	C2.5	C5	C7.5	C10
*pH	H ₂ O	4.52(± 0.04) _c	5.54(± 0.16) _c	5.67(± 0.01) _{bc}	6.47(± 0.13) _{ab}	6.53(± 0.02) _a
CE	mS cm ⁻¹	0.48(± 0.02) _d	0.73(± 0.04) _c	0.79(± 0.03) _{bc}	1.03(± 0.03) _a	0.92(± 0.01) _{ab}
P	g kg ⁻¹	0.22(± 0.01) _d	1.32(± 0.08) _c	1.70(± 0.02) _{bc}	2.02(± 0.21) _{ab}	2.45(± 0.08) _a
Na	g kg ⁻¹	0.11(± 0.01) _d	0.60(± 0.03) _c	0.76(± 0.03) _b	0.90(± 0.00) _b	1.30(± 0.04) _a
K	g kg ⁻¹	7.75(± 0.20) _b	11.70(± 0.08) _a	11.82(± 0.59) _a	12.08(± 0.41) _a	13.05(± 0.41) _a
N	g kg ⁻¹	22.09(± 4.89) _a	15.05(± 0.38) _{ab}	10.89(± 1.04) _b	13.64(± 2.03) _{ab}	15.85(± 1.36) _{ab}
Ca	g kg ⁻¹	3.84(± 0.56) _a	3.58(± 0.82) _a	3.48(± 1.64) _a	3.33(± 1.25) _{ab}	2.84(± 1.30) _b
*Mg	g kg ⁻¹	40.36(± 0.12) _a	38.65(± 4.40) _a	36.00(± 1.30) _a	33.83(± 2.50) _a	30.26(± 0.66) _a
Cu	mg kg ⁻¹	13.10(± 0.35) _{bc}	11.47(± 1.05) _c	16.50(± 0.60) _{bc}	17.91(± 1.13) _{ab}	22.42(± 1.73) _a
*Fe	g kg ⁻¹	3.89(± 0.00) _d	6.04(± 3.52) _{cd}	9.05(± 0.01) _{ab}	8.77(± 0.23) _{bc}	10.87(± 0.29) _a
Ni	mg kg ⁻¹	33.10(± 0.57) _{ab}	32.73(± 3.79) _b	37.34(± 0.94) _{ab}	41.00(± 1.02) _{ab}	43.85(± 3.33) _a
Mn	mg kg ⁻¹	152.20(± 2.84) _d	177.24(± 5.14) _c	212.44(± 6.51) _b	211.38(± 6.79) _b	253.95(± 3.30) _a
*Cd	mg kg ⁻¹	0.15(± 0.00) _c	0.74(± 0.00) _c	0.74(± 0.06) _{bc}	1.2(± 0.15) _a	1.04(± 0.05) _{ab}
Zn	mg kg ⁻¹	24.80(± 2.33) _c	38.14(± 2.71) _{bc}	54.80(± 4.03) _{ab}	62.44(± 5.13) _a	69.33(± 6.44) _a
Cr	mg kg ⁻¹	15.23(± 0.85) _b	22.50(± 1.96) _{ab}	27.92(± 3.55) _{ab}	26.01(± 2.14) _{ab}	32.80(± 4.03) _a
Pb	mg kg ⁻¹	ND	ND	ND	ND	1.62

Legenda: pH: potencial hidrogeniônico; CE: condutividade elétrica P: fósforo; Na: sódio; K: potássio; N: nitrogênio; Ca: cálcio; Mg: magnésio; Cu: cobre; Fe: ferro; Ni: níquel; Mn: manganês; Cd: cádmio; Zn: zinco; Cr: cromo; ND: Não detectado. C – cascalho proveniente de perfuração onshore. CS – substrato comercial. Em que: C0: 100% SC (controle); C2.5: 2,5% C; C5: 5% C; C7,5: 7,5% C; C10: 10% C. Médias seguidas de mesma letra na mesma linha e para a mesma variável não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5%. * Médias seguidas de mesma letra na mesma linha e para a mesma variável não diferem entre si pelo teste de Kruskal-Wallis ao nível de significância de 5%.

3.2. Crescimento e qualidade das mudas de ipê-branco

Os substratos, de modo geral, influenciaram as variáveis morfológicas e a qualidade das mudas de ipê-branco ($p \leq 0,05$) (Figura 1 e Tabela 4). As diferenças de altura ocorreram apenas aos 90 e 120 dias após o transplante (Figura 1), quando as plântulas mais altas estavam nos substratos C5 e as mais baixas nos substratos C7.5 ou C10. No C0 e C2.5 as alturas foram intermediárias. Houve redução na altura aos 150 dias devido a alguns ataques inesperados de pragas que danificaram o ápice do caule e das folhas (herbivoria). Após esse evento, os substratos não diferiram em altura (Figura 1A).

O diâmetro do caule (DC) não diferiu entre os substratos, exceto aos 210 dias, quando o substrato C2.5 apresentou o maior diâmetro e o C0 o menor (Figura 1B).

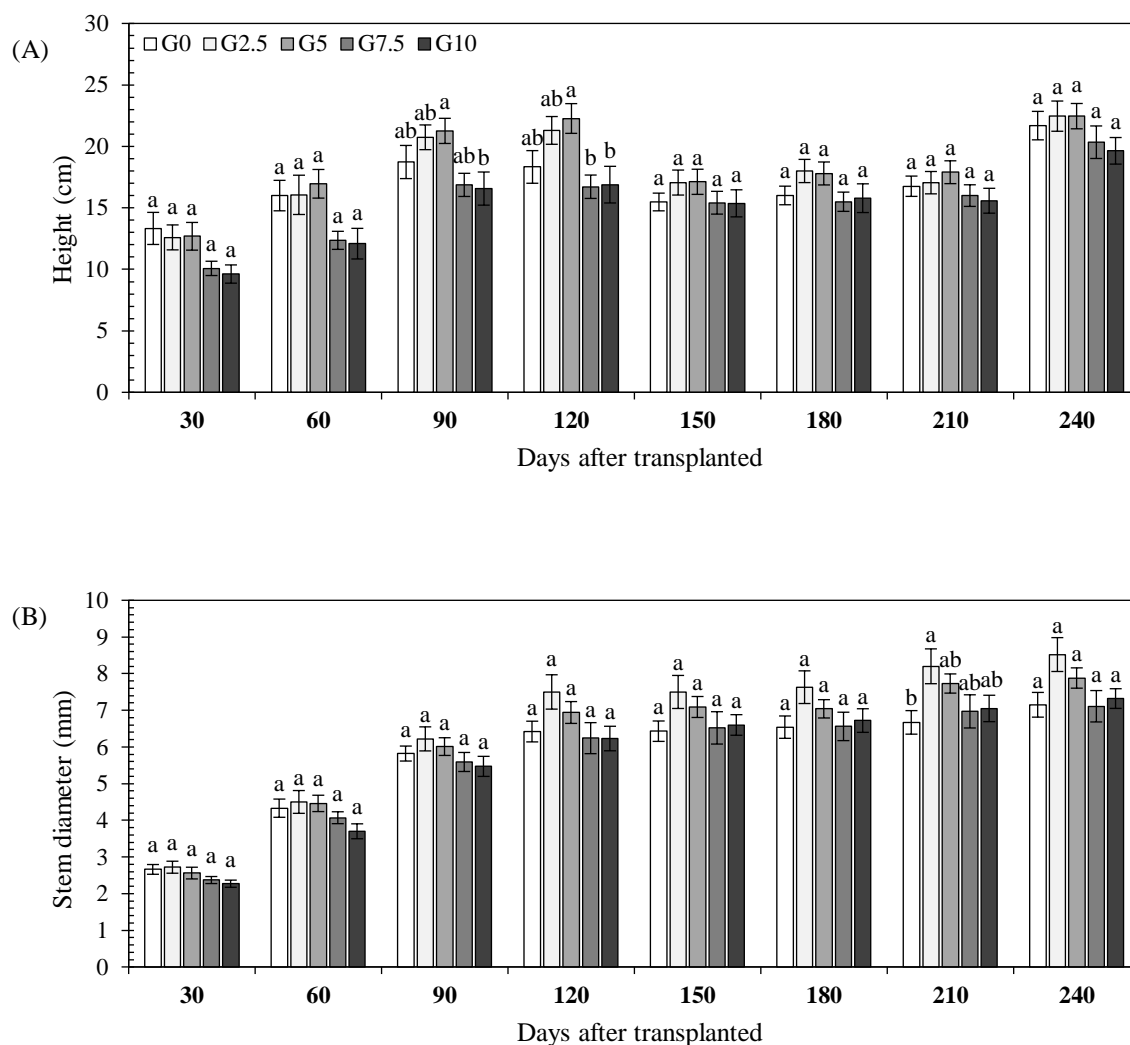


Figura 1. A - Crescimento médio em altura ($H \pm$ erro padrão) e B - diâmetro do caule ($SD \pm$ erro padrão) de mudas de *T. roseoalba* aos 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210 e 240 dias de desenvolvimento. G (C) – cascalho proveniente de perfuração onshore. CS (SC) – substrato comercial. Em que: G0 (C0): 100% CS (SC - controle); G2.5 (C2.5): 2,5% G (C); G5 (C5): 5% G (C); G7,5 (C7.5): 7,5% G (C); G10 (C10): 10% G (C). Barras seguidas de mesma letra no mesmo dia de desenvolvimento não diferem pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5%.

Os substratos não afetaram as características da parte aérea como clorofila (CT), área foliar (AF), massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca total (MST), relação altura/diâmetro (H/SD) e a relação biomassa da parte aérea e da raiz, relação ($MSPA/MSR$) ($p > 0,05$) (Tabela 4). Por outro lado, os substratos influenciaram a massa seca da raiz (MSR), com valores maiores no C2.5 e menores no C0, não sendo observadas diferenças para as demais proporções. O substrato C2.5 também apresentou o maior índice de qualidade de Dickson (IQD), enquanto as proporções C0 e C7.5 tiveram os menores valores, não sendo observadas diferenças significativas entre estes substratos e os demais (Tabela 4).

Tabela 4. Média e erro padrão (entre parênteses) das variáveis de qualidade de mudas de *T. rosealba* produzidas em substratos com doses crescentes de cascalho *onshore*.

Variáveis Morfológicas		Substratos				
		G0	G2.5	G5	G7.5	G10
* Clorofila	mg m ⁻²	49.70(±1.81) _a	50.91(±0.99) _a	50.20(±0.71) _a	50.94(±2.26) _a	52.00(±0.86) _a
* Área foliar	cm ⁻²	358.31(±48.6) _a	343.30(±27.9) _a	391.32(±34.4) _a	270.28(±30.6) _a	330.18(±39.8) _a
* Massa seca da parte aérea ₁	g	2.95(±0.4) _a	3.40(±0.3) _a	3.30(±0.3) _a	2.65(±0.3) _a	3.00(±0.4) _a
Massa seca de raiz ₁	g	2.25(±0.3) _b	4.20(±0.7) _a	3.54(±0.3) _{ab}	2.51(±0.4) _{ab}	3.20(±0.6) _{ab}
* Massa seca total ₁	g	5.20(±0.6) _a	7.60(±1.0) _a	6.80(±0.4) _a	5.15(±0.7) _a	6.15(±0.8) _a
* Altura/diâmetro do caule		3.05(±0.1) _a	2.70(±0.1) _a	2.90(±0.2) _a	2.90(±0.1) _a	2.71(±0.2) _a
Massa seca da parte aérea/Massa seca de raiz		1.31(±0.1) _a	0.81(±0.1) _a	0.93(±0.1) _a	1.06(±0.2) _a	0.94(±0.2) _a
Índice de Qualidade de Dickson		1.20(±0.1) _b	2.20(±0.3) _a	1.86(±0.2) _{ab}	1.32(±0.2) _b	1.67(±0.2) _{ab}

Legenda: C – cascalho proveniente de perfuração onshore. SC – substrato comercial. Em que: C0: 100% SC (controle); C2.5: 2,5% C; C5: 5% C; C7,5: 7,5% C; C10: 10% C. Médias seguidas de mesma letra na mesma linha e para a mesma variável não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5%. * Médias seguidas de mesma letra na mesma linha e para a mesma variável não diferem entre si pelo teste de Kruskal-Wallis ao nível de significância de 5%. ₁Média de 10 mudas por substrato formulado.

A análise de componentes principais (ACP) resumiu efetivamente as características de crescimento e qualidade das mudas, com 85,4% da variabilidade explicada por duas dimensões (Dim1: 67,1% e Dim2: 18,3%) (Figura 2). Foram observados dois grupos de variáveis de semeadura: um com coordenadas positivas para Dim2, incluindo variáveis correlacionadas à parte aérea H, MSPA e AF, e outro com variáveis correlacionadas à raiz DC, MSR e IQD e coordenadas negativas para Dim2. Todas as variáveis apresentaram coordenadas positivas para Dim1, que foi a dimensão que explicou a maior parte da variância dos dados, ilustrando a correlação moderada a alta entre as variáveis.

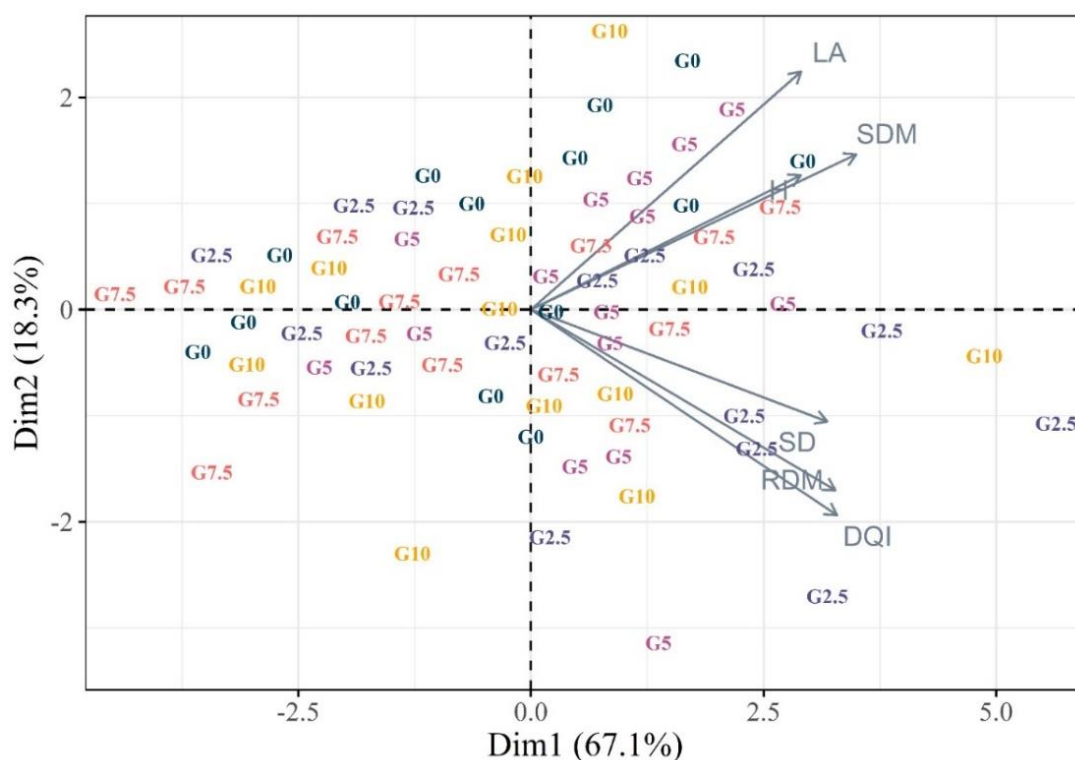


Figura 2. Diagrama de ordenação resultante da análise de componentes principais (ACP) das variáveis morfológicas de mudas de *T. roseoalba* produzidas em substratos com doses crescentes de cascalho oriundo de perfuração de poço de petróleo terrestre aos 240 dias de idade. C – cascalho proveniente de perfuração onshore. SC – substrato comercial. Em que: C0: 100% SC (controle); C2.5: 2,5% C; C5: 5% C; C7,5: 7,5% C; C10: 10% C.; H 240: altura; DP 240: diâmetro do caule; AF: área foliar; MSPA: massa seca da parte aérea; MSR: massa seca de raiz; IQD: Índice de Qualidade de Dickson.

Figure 2. Ordering diagram resulting from the principal component analysis (PCA) of the morphological variables of *T. roseoalba* seedlings produced on substrates with increasing doses of gravel from onshore oil well drilling at 240 days of age. G – gravel from onshore drilling. CS – commercial substrate. In which: G0: 100% CS (control); G2.5: 2.5% G; G5: 5% G; G7.5: 7.5% G; G10: 10% G. In which: G0: 100% CS (control); G2.5: 97.5% CS + 2.5% G; G5: 95% CS + 5% G; G7.5: 92.5% CS + 7.5% G; G10: 90% CS + 10% G; H 240: height; SD 240: stem diameter; LA: leaf area; SDM: shoot dry mass; RDM: root dry mass; DQI: Dickson Quality Index.

As amostras de mudas foram divididas em três grupos com base na análise de agrupamento: grupos 1, 2 e 3, contendo 44%, 8% e 48% das amostras, respectivamente (Figura 3). O Grupo 1 localizou-se em coordenadas opostas das variáveis morfológicas e, portanto, incluiu mudas com menores valores nesses parâmetros. O grupo 3 incluiu mudas com valores intermediários a altos nas variáveis morfológicas, enquanto o grupo 2 incluiu mudas com valores mais elevados nos parâmetros morfológicos, principalmente nos parâmetros radiculares (Figura 3). Ao examinar a distribuição dos substratos dentro dos grupos, observou-se que C0 e C7.5 tiveram distribuição de mudas semelhante, com 57% e 60% de suas mudas no Grupo 1 e 43% e 40% no Grupo 3, respectivamente. Por outro lado, C2.5 teve 40%, 27% e 33% de suas mudas nos grupos 1, 2 e 3, respectivamente. Enquanto o C5 teve 20%, 7% e 73% e por último, o C10 teve 43%, 7% e 50% de suas mudas nos grupos 1, 2 e 3, respectivamente.

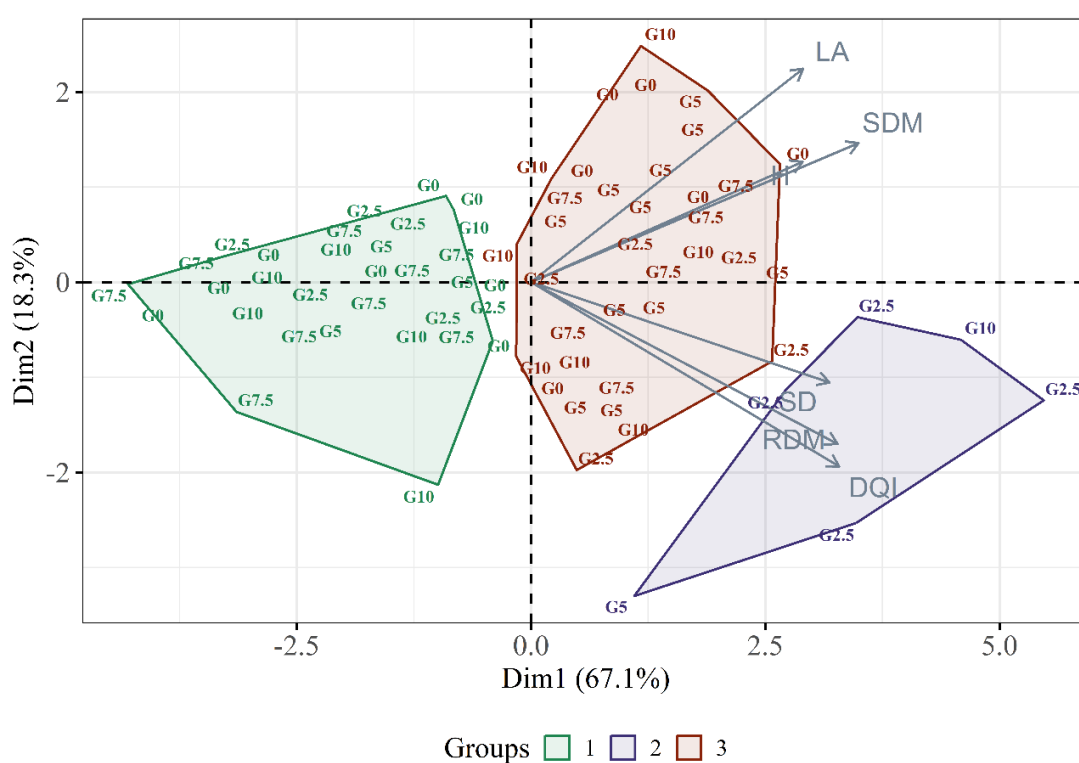


Figura 3. Análise de componentes principais considerando o agrupamento das observações por meio da análise de agrupamento de mudas de *T. roseoalba* aos 240 dias de idade produzidas em substratos com doses crescentes de cascalho de perfuração de poços de petróleo terrestres. C – cascalho proveniente de perfuração onshore. SC – substrato comercial. Em que: C0: 100% CS (controle); C2.5: 2,5% C; C5: 5% C; C7,5: 7,5% C; C10: 10% C.; H 240: altura; DC 240: diâmetro do caule; AF: área foliar; MSPA: massa seca da parte aérea; MSR: massa seca de raiz; IQD: Índice de Qualidade de Dickson.

Figure 3. Principal component analysis considering the clustering of observations by clustering analysis of *T. roseoalba* seedlings at 240 days of age produced on substrates with increasing doses of drilling gravel from onshore oil wells. G – gravel from onshore drilling. CS – commercial substrate. In which: G0: 100% CS (control); G2.5: 2.5% G; G5: 5% G; G7.5: 7.5% G; G10: 10% G.; H 240: height; SD 240: stem diameter; LA: leaf area; SDM: shoot dry mass; RDM: root dry mass; DQI: Dickson Quality Index.

3.3. Estado nutricional das mudas de ipê-branco

Os substratos influenciaram a concentração (Tabela 1) e acúmulo (Figura 4) de macronutrientes, micronutrientes e metais pesados na parte aérea e raiz das mudas. De modo geral, foi observado elevado acúmulo de elementos na parte aérea (Tabela 5), exceto Mn e Fe, que foram encontrados em maiores valores nas raízes (Tabela 1). A concentração e acúmulo de Cu e Cr não predominaram em compartimento específico (Tabela 1 e Tabela 5).

A concentração dos elementos analisados na parte aérea das mudas, em geral, seguiu uma ordem decrescente de quantidade dos elementos da seguinte forma: $\text{Ca} < \text{K} < \text{P} < \text{Mg} < \text{N} < \text{Na} < \text{Fe} < \text{Zn} < \text{Pb} < \text{Ni} < \text{Cr} < \text{Mn} < \text{Cu} < \text{Cd}$ (Tabela 1). O acúmulo de Na, K, Cd, Cr e Ni na parte aérea não diferiu entre os substratos (Tabela 5). Por outro lado, foram observados maiores acúmulos de N e Mg na parte aérea das mudas produzidas nos substratos C0, C2.5, C5 e C7.5 (Tabela 5). Os acúmulos de P e Ca foram maiores na parte aérea das mudas produzidas no substrato C5, sendo que este substrato também apresentou valores elevados de K (Tabela 5). Para o Cu, foi observado maior acúmulo na parte aérea das plântulas dos substratos C5 e C10, enquanto o Mn foi maior no C10 (Tabela 5). O acúmulo de Pb e Zn foi maior nos substratos C2.5, C5, C7.5 e C10 do que C0 (Tabela 5).

A concentração dos elementos analisados nas raízes das mudas seguiu a seguinte ordem decrescente: $\text{K} < \text{Ca} < \text{P} < \text{Mg} < \text{N} < \text{Na} < \text{Fe} < \text{Mn} < \text{Zn} < \text{Cr} < \text{Ni} < \text{Cu} < \text{Pb} < \text{Cd}$ (Tabela 1), e diferenças entre substratos foram observadas para quase todos os acúmulos de elementos, exceto para Ni (Tabela 5). Os elementos Ca, Mg, Na, Fe e Mn foram maiores nas raízes das mudas produzidas em substrato com adição de cascalho. Para N foram observados maiores acúmulos principalmente nas raízes das mudas produzidas nos substratos C2.5, que não diferiram de C0 e C5; e esse padrão foi encontrado para acúmulos de Cu (Tabela 5). Os substratos C2.5, C5 e C10 proporcionaram maior acúmulo de P e K (Tabela 5). Os valores de Cd foram maiores nos substratos C0 e C10, enquanto os maiores acúmulos de Pb foram observados nas raízes C2.5 e C5 (Tabela 5). Os substratos C0 e C2.5 proporcionaram os maiores acúmulos de Zn, e o acúmulo de Cr foi maior nas raízes do substrato C2.5 (Tabela 5).

Tabela 5. Média e erro padrão (entre parênteses) de acúmulo dos nutrientes e metais nos diferentes compartimentos vegetativos das mudas de *T. roseoalba* produzidas em substratos com proporções crescentes de cascalho *onshore*.

Nutrientes e metais		Substratos				
		C0	C2.5	C5	C7.5	C10
Parte Aérea						
N	g kg ⁻¹	12.3(±0.42) _a	12.9(±0.71) _a	11.7(±1.9) _a	10.6(±0.8) _a	7.2(±0.3) _b
P	g kg ⁻¹	66.2(±1.4) _b	66.1(±4.0) _b	89.6(±4.7) _a	60.6(±6.5) _b	68.6(±2.5) _b
K	g kg ⁻¹	114.3(±2.2) _a	127.9(±8.1) _a	143.9(±10.3) _a	118.4(±10.2) _a	124.8(±2.7) _a
Ca	g kg ⁻¹	117.5(±4.0) _{ab}	114.7(±7.7) _b	152.1(±9.9) _a	120.5(±12.9) _{ab}	130.6(±5.6) _{ab}
Mg	g kg ⁻¹	28.4(±0.8) _a	29.1(±2.0) _a	28.5(±2.0) _a	21.7(±2.3) _{ab}	21.6(±1.1) _b
Na	g kg ⁻¹	4.4(±0.17) _a	4.6(±0.31) _a	4.7(±0.35) _a	4.0(±0.42) _a	4.3(±0.17) _a
Fe	g kg ⁻¹	0.48(±0.01) _a	0.47(±0.02) _a	0.48(±0.04) _a	0.34(±0.04) _a	0.0(±0.01) _a
Cd	mg kg ⁻¹	4.2(±0.08) _a	4.7(±0.34) _a	5.3(±0.41) _a	4.8(±0.50) _a	5.0(±0.39) _a
Cr	mg kg ⁻¹	66.1(±1.77) _a	81.4(±6.0) _a	72.0(±5.5) _a	79.5(±7.9) _a	80.5(±4.2) _a
Cu	mg kg ⁻¹	11.2(±0.70) _{cd}	9.3(±0.68) _d	18.1(±1.2) _{ab}	14.8(±1.8) _{bc}	21.6(±1.2) _a
Mn	mg kg ⁻¹	43.8(±0.70) _c	57.2(±3.0) _b	61.0(±3.5) _b	45.4(±3.9) _c	75.1(±2.0) _a
Ni	mg kg ⁻¹	83.1(±4.6) _a	91.6(±5.9) _a	89.0(±6.8) _a	79.0(±9.1) _a	92.0(±4.8) _a
Pb	mg kg ⁻¹	76.4(±2.2) _b	92.8(±5.2) _{ab}	99.6(±6.7) _a	84.0(±9.1) _{ab}	94.0(±3.5) _{ab}
Zn	mg kg ⁻¹	146.6(±3.7) _b	197.7(±16.1) _{ab}	244.0(±15.9) _a	192.6(±20.5) _{ab}	212.3(±11.7) _a
Raiz						
N	g kg ⁻¹	4.73(±0.6) _{ab}	7.71(±0.9) _a	4.88(±0.7) _{ab}	4.12(±0.4) _b	0.00(±0.00) _c
P	g kg ⁻¹	24.7(±1.4) _b	33.4(±4.2) _{ab}	36.5(±1.6) _a	20.8(±1.6) _b	29.7(±3.3) _{ab}
K	g kg ⁻¹	50.9(±2.9) _b	71.2(±7.5) _{ab}	86.2(±1.5) _a	57.1(±4.8) _b	93.7(±7.8) _a
Ca	g kg ⁻¹	26.3(±1.8) _b	48.3(±5.4) _a	45.8(±1.4) _a	35.2(±2.7) _{ab}	42.1(±4.4) _a
Mg	g kg ⁻¹	9.96(±0.6) _b	20.5(±2.3) _a	22.2(±0.7) _a	17.5(±1.2) _a	19.8(±1.6) _a
Na	g kg ⁻¹	2.0(±0.1) _b	3.4(±0.4) _a	2.9(±0.06) _a	2.3(±0.2) _{ab}	2.9(±0.2) _a
Fe	g kg ⁻¹	2.0(±0.2) _b	3.0(±0.4) _a	3.0(±0.08) _{ab}	3.0(±0.25) _{ab}	3.0(±0.3) _{ab}
Cd	mg kg ⁻¹	1.8(±0.11) _a	1.0(±0.11) _b	0.3(±0.02) _c	0.7(±0.05) _b	2.0(±0.15) _a
Cr	mg kg ⁻¹	68.2(±5.1) _b	125.4(±15.5) _a	46.7(±2.1) _c	24.3(±1.8) _d	16.0(±1.4) _e
Cu	mg kg ⁻¹	15.3(±1.2) _a	13.9(±1.5) _a	11.1(±0.4) _{ab}	8.6(±0.6) _b	9.1(±0.7) _b
Mn	mg kg ⁻¹	60.8(±5.7) _b	150.4(±13.2) _a	130.1(±2.3) _a	111.1(±8.7) _a	106.2(±11.6) _a
Ni	mg kg ⁻¹	41.8(±2.4) _a	52.1(±8.1) _a	47.6(±0.9) _a	35.7(±2.6) _a	35.2(±2.9) _a
Pb	mg kg ⁻¹	4.5(±0.3) _b	9.8(±1.1) _a	8.1(±0.5) _a	5.4(±0.5) _b	5.1(±0.5) _b
Zn	mg kg ⁻¹	70.0(±5.3) _a	65.1(±6.7) _a	58.0(±01.6) _{ab}	45.2(±3.6) _b	56.1(±5.8) _{ab}

Legenda: C – cascalho proveniente de perfuração onshore. SC – substrato comercial. Em que: C0: 100% SC (controle); C2.5: 2,5% C; C5: 5% C; C7,5: 7,5% C; C10: 10% C. Médias seguidas de mesma letra na mesma linha e para a mesma variável não diferem entre si pelo teste de Kruskal-Wallis ao nível de significância de 5%.

4. DISCUSSÃO

4.1. Efeitos das proporções de cascalho nas características físicas e químicas dos substratos

A presença de cascalho de perfuração impactou nas propriedades físicas dos substratos. Uma maior proporção de cascalho aumentou a densidade e reduziu a porosidade total e o espaço de aeração do substrato. É importante ressaltar que o substrato comercial era orgânico, composto principalmente por casca de pinus, enquanto a brita era mineral com granulometria semelhante à areia fina. Os materiais orgânicos normalmente têm menor densidade e maior porosidade do que os materiais minerais, por isso é crucial misturar estes materiais para obter substratos adequados (Fermino e Mieth, 2018).

As características físicas ideais para substratos utilizados para produção de mudas em tubetes de polipropileno são baixa densidade ($0,25$ a $0,40 \text{ g cm}^{-3}$) e alta porosidade (75 a 85%), conforme recomendado por Fermino e Mieth (2018) e Gonçalves e Poggiani (1996). Também é importante haver equilíbrio entre macro e microporos para melhorar a aeração, infiltração de água e drenagem (Costa et al., 2017; Mendonça et al., 2021). Todos os substratos avaliados atenderam a esses critérios e podem ser considerados adequados. Considerando que substratos menos densos podem facilitar o manejo do viveiro, a retirada das mudas dos recipientes e o transporte até o local de plantio (Alonso et al., 2024), proporções intermediárias de cascalho seriam mais recomendáveis.

Os substratos C0, C2.5, C5 e C7.5 ficaram dentro da faixa ideal de 20 a 30% de água disponível (Faria et al., 2017), enquanto apenas o substrato C10 ficou abaixo do ideal. A capacidade de retenção de água (CRA10) (Tabela 2) ficou na faixa ideal de 45 - 65% em todos os substratos formulados (Regan, 2014), o que é bom uma vez que CRA10 é a propriedade física que indica manejo adequado de irrigação para o substrato (Schafer et al., 2015; Cunha et al., 2022). Quanto menor a retenção de água, maior o volume de água utilizado ou maior a frequência de irrigação.

O aumento da proporção de cascalho melhorou as propriedades químicas dos substratos (Tabela 3). Os valores de pH encontrados nos substratos C2.5, C5 e C7.5 ficaram dentro da faixa ideal de 5,0 - 6,5 para o crescimento das plantas (Kratz e Wendling, 2016; Abreu et al., 2019). As proporções crescentes também elevaram os níveis de condutividade elétrica (Tabela 3), que estão dentro da faixa adequada ($0,76 \text{ dS m}^{-1}$ a $1,25 \text{ dS m}^{-1}$), exceto para o substrato C0 (controle), que ficou abaixo do nível recomendado ($< 0,76 \text{ dS m}^{-1}$) (Cavins et al., 2000).

Em relação aos metais pesados, suas concentrações nos substratos ficaram abaixo das faixas tóxicas estabelecidas pela Resolução Brasileira nº 420, de 28 de dezembro de 2009 (CONAMA, 2009), que fornece diretrizes para a qualidade do solo e a presença de substâncias químicas. Os valores também ficaram abaixo dos citados por Pillai (1998), que estabelece os limites de concentração de metais tóxicos no solo. A avaliação de metais pesados é fundamental para evitar possível contaminação humana e ambiental na produção, manuseio e plantio das mudas (Alonso et al., 2024). Considerando que os teores de metais pesados estavam abaixo dos limites e que o baixo volume de substrato representa um baixo risco de contaminação do solo após o plantio, pode-se considerar seguro usar as proporções testadas de cascalho de perfuração.

Entre os metais pesados avaliados, Fe e Mn foram os que apresentaram maiores concentrações em substratos com proporções crescentes de cascalho. Ambos os elementos são micronutrientes para as plantas, portanto sua presença no substrato pode ser benéfica. Porém, quando presentes em excesso, esses elementos químicos podem causar toxicidade às plantas (Dechen et al., 2018). Dada a ausência de efeitos adversos no crescimento e nos aspectos visuais das mudas, a utilização de cascalho de perfuração como componente do substrato pode ser uma alternativa para fornecer esses micronutrientes às mudas.

4.2. Efeito das proporções de cascalho no desenvolvimento de mudas

Os substratos formulados com menores proporções de cascalho (C2,5 e C5) contribuíram para o desempenho das mudas, como aumento de altura no substrato C5, e maiores valores de diâmetro de caule, produção de biomassa radicular e qualidade de mudas (IQD), principalmente quando comparado ao substrato comercial. O crescimento em altura associado ao diâmetro do caule são parâmetros essenciais para otimizar a produção e tomar decisões mais rápidas em viveiros, pois são medidas que expressam o potencial de crescimento inicial da muda no campo (Rossa et al., 2010; Araújo et al., 2020). A adição de cascalho ao substrato comercial resultou no maior desenvolvimento da biomassa radicular, sendo que o substrato C2.5 apresentou diferenças significativas apenas do substrato com 100% de substrato comercial, onde foi observado quase o dobro da massa quantificada em C0. A biomassa radicular influencia a capacidade da muda de absorver água e nutrientes (Araújo et al., 2020), sendo de extrema importância para a sobrevivência e crescimento inicial da planta no campo e desenvolvimento ideal na fase de produção.

A Tabela 4 mostra o crescimento equilibrado entre os compartimentos vegetativos (parte aérea e raiz) das mudas produzidas na formulação com proporção de 2,5% (IQD 2,20), seguida da proporção de 5% (IQD 1,86) e 10% (IQD 1,67), principalmente em relação à testemunha (C0: DQI 1,20), indicando a contribuição das respectivas proporções no desenvolvimento e tolerância das mudas de ipê-branco ao uso do cascalho. Segundo Gomes e Paiva (2004), quanto maior o valor obtido para o IQD, melhor será a qualidade das mudas, e diversos estudos têm destacado que as variáveis de crescimento não devem ser consideradas isoladamente na seleção das mudas de melhor qualidade (Andrade et al., 2018; Cunha et al., 2022;

A ACP mostrou associação entre as mudas produzidas no substrato C2.5 e variáveis de crescimento e qualidade, como DC aos 240 dias, MSR e IQD. Por outro lado, as mudas produzidas no C5 apresentaram associação com variáveis de desenvolvimento da parte aérea, como AF, MSPA e H aos 240 dias (Tabela 4 e Figura 2). Assim, os substratos C2.5 e C5, em geral, proporcionaram mudas de melhor qualidade, com destaque para o substrato C2.5, que apresentou maior IQD e massa seca de raiz.

4.3. Estado nutricional das mudas de ipê-branco

Os substratos C2.5 e C5 proporcionaram o maior acúmulo de elementos nas mudas, enquanto o substrato comercial sozinho proporcionou o menor. A falta de diferenças significativas para a maioria dos elementos entre os substratos nos compartimentos vegetativos sugere que os teores de metais e sais no cascalho não foram um fator limitante para a nutrição e crescimento de mudas de *T. roseoalba*.

Entre os metais que se destacaram e para os quais foram observadas diferenças estão o Cu. O maior acúmulo de Cu foi observado na parte aérea das mudas do C10 (21,61 mg kg⁻¹) seguido do C5 (18,01 mg kg⁻¹), enquanto o menor acúmulo de Cu foi observado para a proporção C2,5, o que proporcionou melhor qualidade das mudas. Silva et al. (2021), produzindo mudas de ipê branco em substratos à base de resíduos de cobre e matéria orgânica, demonstraram que à medida que aumentava a proporção de resíduos, o teor de Cu nas raízes também aumentava. Encontraram níveis de 118 mg kg⁻¹, superiores aos observados neste estudo (Tabela 5 e Tabela 1). Os autores explicam que a espécie *T. roseoalba* é uma planta que possui a fitoestabilização como mecanismo de fitorremediação. Portanto, o acúmulo de Cu proporcionado pelas formulações com cascalho está abaixo do que a espécie consegue assimilar.

Os elevados valores de Cr nas raízes do substrato C2.5 (Tabela 5 e Tabela 1), assim como C0, podem estar relacionados aos baixos valores de pH (C0: 4,52 e C2,5: 5,54) da formulação do substrato. O processo redox do cromo pode ocorrer em meios com altos níveis de matéria orgânica e pH ácido. Este processo transforma o metal em formas mais disponíveis, favorecendo assim a bioacumulação potencial (Reis, 2019). Com isso, as mudas poderão aproveitar melhor o Cr em determinada proporção (Silva et al., 2021) e pH. Os resultados encontrados são corroborados por Oliveira et al. (2021) ao avaliarem os efeitos da toxicidade do Cr no crescimento de mudas de *Eucalyptus urophylla*. A concentração dos elementos quantificados nos compartimentos vegetais corrobora as variáveis discutidas acima demonstrando que a adição de cascalho ao substrato comercial amplamente utilizado classificou as formulações na faixa de pH adequada tornando os elementos mais biodisponíveis para as mudas e contribuindo para a formação de parte aérea e crescimento radicular (Kratz e Wendling, 2016; Regan, 2014; Abreu et al., 2019).

5. CONCLUSÕES

O cascalho de cascalho derivado da perfuração de poços de petróleo pode potencialmente ser utilizado como componente condicionante do substrato para produção de mudas de ipê-branco (*Tabebuia roseoalba*). Nossos resultados mostram que altas proporções de cascalho aumentam a densidade e diminuem a umidade e a porosidade total dos substratos, e principalmente os substratos C2,5% e C5% aumentaram a água disponível, afetando consequentemente altura das mudas, diâmetro do caule, massa seca das raízes e índice de qualidade de Dickson, variáveis relacionadas com a qualidade das mudas. Além disso, essas mesmas proporções foram relacionadas com maior acúmulo de nutrientes e metais pesados nos compartimentos aéreo e radicular, contribuindo com a nutrição das mudas.

Os teores de metais e sais nos resíduos industriais da extração de petróleo utilizados neste estudo, cascalho *onshore* (terrestre), além de não ultrapassarem os limites exigidos por lei, não comprometeram o desenvolvimento da espécie. Uma proporção de 10% de cascalho pode ser utilizada sem comprometer o desenvolvimento da muda no viveiro, e 2,5% e 5% são as proporções recomendadas para a produção de mudas de *Tabebuia roseoalba* (ipê branco) de alta qualidade.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbade, LC, Takaki, M. Teste de tetrazólio para avaliação da qualidade de sementes de *Tabebuia roseoalba* (Ridl.) Sandwith - bignoniaceae, submetidas ao armazenamento. Revista Árvore, 2014;38:2:233–240. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622014000200003>
- Abreu, AHMD, Alonso, JM, Melo, LAD, Leles, PSDS, Santos, GRD. Caracterização de biossólidos e potencial utilização na produção de mudas de *Schinus terebinthifolia* Raddi. Eng Sanit Ambiente. 2019;24:591-599. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522019108265>.
- Almeida, PC, Araújo, ODQF, Medeiros, JL. Gerenciando resíduos de cascalhos de perfuração *offshore* para melhorar a sustentabilidade. J Limpo Prod. 2017;165:143-156. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.062>.
- Almeida, JDB, Raposo, Á. LQRS, Marques, SKJ Caracterização da cascata de perfuração dos poços de petróleo da bacia Sergipe-Alagoas para produção de concreto permeável. Rev Iberoam Cienc Ambie. 2021;12:585-598. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.007.0050>.

Alonso, JM, Pinheiro, EFM, Antunes, LFS, Lima, TC, Ribeiro, JG, Leles, PSS. Propriedades químicas e físicas do lodo de esgoto como substrato para mudas de árvores. *Internacional J. Meio Ambiente. Ciência. Tecnologia*. 2024. <https://doi.org/10.1007/s13762-024-05533-8>

Alvares, CA, Stape, JL, Sentelhas, PC, Gonçalves, JDM, Sparovek, G. Mapa de classificação climática de Köppen para o Brasil. *Meteorol Z, Berlim*. 2013;22:711-728. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0507.

Andrade, FHAD, Pereira, WE, Morais, RR, Silva, AFD, Barbosa Neto, MA. Efeito da aplicação de fósforo no substrato e uso de água salina em mudas de macieira. *Pesq. Agropecu. Tropa*. 2018; 48:190-199. ISSN: 1983-4063.

Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis: 2021. Rio de Janeiro. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/anuario-estatistico/arquivos-anuario-estatistico-2021/anuario-2021.pdf>.

Araújo, CSD, Lunz, AMP, Santos, VBD, Andrade Neto, RDC, Nogueira, SR, Santos, RSD. Aproveitamento de resíduos da agroindústria como substrato para produção de mudas de *Euterpe precatoria*. *Pesq. Agropecu. Tropa*. 2020;50. DOI: <https://doi.org/10.1590/1983-40632020v5058709>.

Bandeira, RAF, Araújo, AS, Junior, AMS, Junior, FOF. 2019. Viabilidade técnica da aplicação da cascata de diâmetro de petróleo na fabricação de concreto betuminoso usinado a quente. *Caderno de Pesquisa, Ciência e Inovação*. 2019;2:43.

BRASIL, 2007. Ministério da Agricultura e Meio Ambiente (MAPA) - Secretaria de Defesa Agropecuária (SDA). Instrução normativa SDA N° 17 de 21 de maio de 2007. Métodos Analíticos Oficiais para Análise de Substratos e Condicionadores de Solos. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/legislacao/in-17-de-21-05-2007-aprova-metodo-substrato.pdf>

BRASIL, 2008. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 31, de 23 de outubro de 2008. Altera os subitens 3.1.2, 4.1 e 4.1.2, do Anexo à Instrução Normativa SDA nº 17, de 21 de maio de 2007. <<http://extranet.agricultura.gov.br/sislegisconsulta/consultarLegislacao.do?operacao=visualizar&id=19154>>.

Cavins, TJ, Whipker, BE, Fonteno, WC, Harden, B, McCall, I, Gibson, JL. Monitoramento e gerenciamento de pH e EC usando o método de extração PourThru. *Folheto Informativo sobre Horticultura*. 2000;590:1-17.

CONAMA, 2009. Resolução N o 420, de 28 de Dezembro DE 2009. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em ocorrência de atividades antrópicas. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/wp-content/uploads/sites/17/2017/09/resolucao-conama-420-2009-gerenciamento-de-acs.pdf>.

Costa, JCF, Mendonça, RMN, Fernandes, LF, Oliveira, FP, Santos, D. Caracterização física de substratos orgânicos para o enraizamento de estacas de goiabeira. *Rbas*. 2017;7:16–23. DOI: <http://dx.doi.org/10.21206/rbas.v7i2.390>.

Cunha, FL, Silva, OMD, Araújo, VCD, Venturin, N, Melo, LAD. Palha de café carbonizada em substratos renováveis para produção de açúcar de *Eucalyptus urophylla* e *Anadenanthera macrocarpa*. *Ciência Florestal*. 2022;32:548-572. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509837069>.

De Boodt, M. e Verdonck, O. As propriedades físicas dos substratos na horticultura. *Acta Horti*. 26, 1972; 37-44. DOI : <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1972.26.5>.

Dechen, AR, Nachtigall, GR., Carmello, QAC, Santos, LA, Sperandio, MVL. Micronutrientes. In: Fernandes, MS, Souza, SR, Santos, LA. *Nutrição Mineral de Plantas*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 2018. pág. 328-354.

Dickson, A, Folha, A, Hosner, JF. Avaliação da qualidade do estoque de mudas de abeto branco e pinheiro branco em viveiros. *Floresta Crônica*. 1960;36:10-13. DOI: <https://doi.org/10.5558/tfc36010-1>.

EPA. Perfil da Indústria de Extração de Petróleo e Gás. In: Projeto Caderno Setorial, EPA/310-R-99-006, outubro. 2000.

Faria, JCT, Melo, LA, Brondani, GE, Delarmelina, WM, Silva, DSN, Nieri, EM. Substratos formulados com resíduos orgânicos na produção de mudas de *Moquinias trumpolymorphum*. *Floresta*. 2017;47:523. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/rf.v47i4.50568>.

Feres, JM, Sebbenn, AM, Guidugli, MC, Mestriner, MA, Moraes, MLT, Alzate-Marin, AL. Parâmetros do sistema de acasalamento em níveis hierárquicos de frutos, indivíduos e populações da árvore tropical brasileira polinizada por insetos, *Tabebuia roseo-alba* (Bignoniaceae). *Genética da Conservação*, 2012;13:2:393-405, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10592-011-0292-z>

Fermino, MH, Mieth, P. Análise de substratos para produção de mudas de espécies florestais. In: Araújo, MM, Navroski, MC, Schorn, LA. Produção de sementes e mudas: Uma abordagem à silvicultura. Santa Maria: Editora UFSM, 2018, p. 169-186.

Gomes, JM, Paiva, HN. 2004. Viveiros florestais: propagação sexual. 3.ed. Viçosa: UFV, 2004.

Gonçalves, LM, Poggiani, F. 1996. Substratos para produção de mudas florestais. In: CONGRESSO Latino-Americano de Ciência do Solo, 13., 1996, Águas de Lindóia. Resumos. Piracicaba: Sociedade Latino-Americana de Ciência do Solo, 1996. CD-ROM.

Gonçalves, JLM, Santerelli, EG, Moraes Neto, SP, Manara, MP. Produção de mudas de espécies nativas: substrato, nutrição, sombreamento e fertilização. In: Gonçalves, JLM; Benedetti, V. (ed.) Nutrição e fertilização florestal. Piracicaba: ESALQ/USP, 2000.p.309-350

IOGP-Associação Internacional de Produtores de Petróleo e Gás. (2016). Revisão da Tecnologia de Gerenciamento de Resíduos de Perfuração. Relatório 557. IOGP Londres, Reino Unido.

Kämpf, AN. 2005. Produção comercial de plantas ornamentais. Guaíba: Agropecuária. 256 pág.

Kassambara, A. ggpubr: Plotagens prontas para publicação básica em 'ggplot2'. Versão do pacote R 0.4.0. 2020. <https://CRAN.R-project.org/package=ggpubr>.

Kiehl, EJ. Manual de Edafologia: Relações solo-planta. 1.ed. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979. 264p.

Kratz, D, Wendling, I. Crescimento de mudas de *Eucalyptus camaldulensis* em substratos à base de casca de arroz carbonizada. *Rev*. 2016;3:348–354. DOI: <https://doi.org/10.1590/0034-737X201663030011>.

Kratz, D, Wendling, I, Nogueira, AC, Souza, PVD. Propriedades físicas e químicas de substratos renováveis. *Reverendo Árvore*. 2013;37:1103-1113. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622013000600012>.

Lorenzi, H. Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas do Brasil, v.3. São Paulo: Editora Plantarum, 2022. 384p

López, R, Cabrera, F, Madejón, E, Sancho, F, Álvarez, JM. Compostos urbanos como alternativa à turfa em viveiros florestais. *Livros de ciência global: Solo Dinâmico, Planta Dinâmica*. 2008;2:60-66. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10261/9848>.

Malavolta, E. 1980. Elementos de Nutrição Mineral de Plantas. Agronômica “Ceres”, São Paulo.

Melo, LAD, Abreu, AHMD, Leles, PSDS, Oliveira, RRD, Silva, DTD. Qualidade e crescimento inicial de mudas de *Mimosa caesalpinhiifolia* Benth. produzido em diferentes volumes de contêineres. *Ciência Florestal*. 2018;28:47-55. DOI: 10.5902/1980509831574.

Mendonça, VMM, Silva, VDS, Beutler, SJ, Tavares, OCH, Garcia, AC, Pereira, MG. Caracterização de composto orgânico proveniente de resíduos de poda urbana. *Pesquisa*,

Sociedade e Desenvolvimento. 2021;10:e38110615830-e38110615830. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i6.15830>.

Njuguna, J, Siddique, S, Kwroffie, LB, Piromrat, S, Addae-Afoakwa, K, Ekeh-Adegbotolu, U, Oluyemi, G, Yates K, Mishra, AK, Moller, L. O destino dos fluidos de perfuração residuais de atividades da indústria de petróleo e gás nas operações de exploração e produção. Gerenciamento de resíduos. 2022;139:362-380. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.12.025>.

Oliveira, JMD. Crescimento de mudas de espécies nativas em viveiro sob influência de diferentes adubações de base e cobertura. [dissertação], Universidade de Brasília, Brasília, DF. 2021

ONU. Organização das Nações Unidas. Transformando Nosso Mundo: Uma Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. 2015. Disponível em: <https://www.undp.org/content/dam/brazil/docs/agenda2030/undp-br-Agenda2030-completo-pt-br-2016.pdf>.

Perussi, G, Freitas Neto, JJ, Santos, IP, Silva, JMS, Piña-Rodrigues, FCM. Potencial produtivo de sementes florestais nativas para restauração florestal na bacia do Rio Doce. Conjecturas. 2022;22:376-390. DOI: 10.53660/CONJ-2062-MP34.

Pilai, KC. Metais tóxicos em sistemas solo-planta, editado por Sheila M. Ross. Poluição da Água, do Ar e do Solo 102, 209–210, 1998. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1004962228635>.

PNUMA. Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente. Resolução adotada na Assembleia Geral das Nações Unidas em 1 de março de 2019. Década de Restauração de Ecossistemas da ONU. Disponível em: <https://undocs.org/A/RES/73/284>.

R Core Team, 2023. R: Uma linguagem e ambiente para computação estatística. Fundação R para Computação Estatística, Viena, Áustria. Disponível em: <https://www.R-project.org/> (acessado em 8 de abril de 2024).

Regan, R.P. Avaliando componentes alternativos de meios de cultivo. In: Wilkinson, KM; Haase, DL, Pinto, Jr. (coord.). Procedimentos Nacionais: Associações de Viveiros Florestais e de Conservação, 2013. Fort Collins (CO): Serviço Florestal do USDA; Estação de Pesquisa das Montanhas Rochosas. 2014. Processo RMRS-P-72. P. 50-53.

Revelle, W. Psych: Procedimentos para Personalidade e Pesquisa Psicológica, Northwestern University, Evanston, Illinois, EUA. Versão = 2.1.6 2021. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=psych>.

Ribeiro, JC, Portz, A, Santos, FS, Pereira, MG, Zonta, E. Cortes de poços de petróleo e torta de girassol: efeitos na cultura do girassol e atributos químicos do solo. Tecnologia Ambiental. 2022;1-12. DOI: <https://doi.org/10.1080/09593330.2022.2057238>.

Rossa, UB, Triches, GP, Grossi, F, Nogueira, AC, Reissmann, CB, Ramos, MR. Germinação de sementes e qualidade de mudas de *Plinia trunciflora* (jabuticabeira) em função de diferentes tratamentos pré germinativos. Floresta. 2010;40:371-378. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/rf.v40i2.17832>.

Schäfer, G, Souza, PVD, Fior, S. Um panorama das propriedades físicas e químicas de substratos utilizados na horticultura no sul do Brasil. Horticultura Ornamental. 2015;21: 299–306. DOI: <https://doi.org/10.14295/oh.v21i3.735>.

Silva, KS, Arruda, AGR., Costa, DS, Tabosa, LDG, Oliveira, AKD, Oliveira, FKD. Substrato alternativo à base de rejeito de cobre e matéria orgânica na produção de mudas de ipê-branco. Educação, Ciência e Saúde. 2021;8. DOI: <http://dx.doi.org/10.20438/ecs.v8i1.375>.

Tedesco, MJ, Gianello, C, Bissani, CA. 1995. Análise de solo, plantas e outros materiais. 2. Ed. Porto Alegre: Departamento de Solos, UFRGS, p. 177-188.

USEPA. (1998). Digestão ácida de sedimentos, lamas e solos – método EPA 3050B. Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos. Recuperado em 27 de outubro de 2021, de <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-06/documents/epa-3050b.pdf>.

Vieira, CR, Carneiro, RSA, Botelho, RA, Costa, PP. Doses de esterco bovino e equino no crescimento inicial de mudas de ipê branco. *Revista Ecologia e Nutrição Florestal-ENFLO*. 2022;10:e03-e03. DOI: <https://doi.org/10.5902/2316980X70653>.

CAPÍTULO III

POTENCIAL DE APROVEITAMENTO DOS CASCALHOS DE PERFURAÇÃO *OFFSHORE* E *ONSHORE* NA PRODUÇÃO DE MUDAS FLORESTAIS EM LARGA ESCALA

RESUMO

O conceito de sustentabilidade chega as indústrias petrolíferas no sentido contrário da atual execução dos processos de extração e produção, pressionando-as a uma adequação da gestão baseada no desenvolvimento social, crescimento econômico e proteção ambiental. Dentre os passivos ambientais gerados pela cadeia de utilização do petróleo, estão os resíduos denominados cascalhos de perfuração de poços de petróleo terrestres (*onshore*) e marítimos (*offshore*). Em busca da adequação das petroleiras as novas legislações construídas sob a ótica dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, este estudo tem por objetivo viabilizar a reutilização dos cascalhos como insumo na produção de mudas florestais nativas em larga escala, provocando a implementação de uma gestão sustentável dos resíduos. Foram avaliadas as espécies *Enterolobium contortisiliquum*, pioneira de crescimento rápido, e *Tabebuia roseoalba*, não pioneira de crescimento moderado-lento. O experimento foi montado em fatorial 3 x 3 (resíduos x doses). Como componentes de substratos foram utilizados os cascalhos de perfuração, cascalho *onshore*, cascalho *offshore* camada pós-sal e cascalho *offshore* camada pré-sal e, como testemunha um substrato comercial. Os substratos foram formulados com 3 doses de cascalho (2,5%, 5% e 10%), resultando em 10 tratamentos. Os substratos foram avaliados quanto as suas características físicas e químicas. As mudas foram avaliadas pela mensuração de diferentes parâmetros de crescimento e qualidade dos 30 aos 120 dias de desenvolvimento. Os cascalhos *onshore* e *offshore* pós-sal promoveram melhorias nas características físicas e químicas dos substratos. Para o cascalho *offshore* pré-sal foram verificadas características químicas inadequadas em altas doses (5% e 10%) para seu uso como componente de substrato. Os cascalhos *onshore* (todas as doses), *offshore* pós-sal (todas as doses) e *offshore* pré-sal (dose 2,5%), proporcionaram para as mudas de ambas as espécies crescimento e qualidade igual ou superior em comparação ao substrato comercial. A utilização dos cascalhos como insumo na produção de mudas nativas é viável, sendo uma alternativa para formação de cadeia sustentável na gestão dos resíduos, desde o beneficiamento do cascalho até a recomposição de florestas através do plantio das mudas produzidas com o resíduo.

Palavras-chave: *Enterolobium contortisiliquum*, *Tabebuia roseoalba*, Ciclagem, Cascalho *onshore*, Cascalho *offshore*, Resíduos industriais petrolíferos.

ABSTRACT

The concept of sustainability reaches the oil industries in the opposite direction of the current execution of the extraction and production processes, pressuring them to an adequacy of management based on social development, economic growth and environmental protection. Among the environmental liabilities generated by the oil use chain, are the residues called gravels from onshore and offshore oil wells. Seeking the adequacy of oil companies to the new legislation built under the optics of the UN Sustainable Development Goals (SDGs), this study aims to enable the reuse of gravel as an input in the production of native forest seedlings on a large scale, causing the implementation of a sustainable waste management. The species *Enterolobium contortisiliquum*, a fast-growing pioneer species, and *Tabebuia roseoalba*, a moderately slow-growing, non-pioneer species, were evaluated. The experiment was set up in a 3 x 3 factorial design (residues x doses). Drilling gravel, onshore gravel, offshore gravel post-salt layer and offshore gravel pre-salt layer were used as substrate components, and a commercial substrate as witness. The substrates were formulated with 3 doses of gravel (2.5%, 5% and 10%), resulting in 10 treatments. The substrates were evaluated for their physical and chemical characteristics. Seedlings were evaluated by measuring different growth and quality parameters from 30 to 120 days of development. The onshore and offshore post-salt gravels promoted improvements in the physical and chemical characteristics of the substrates. For the pre-salt offshore gravel, inadequate chemical characteristics were verified at high doses (5% and 10%) for its use as a substrate component. The onshore (all doses), offshore post-salt (all doses) and offshore pre-salt (2.5% dose) gravels provided for the seedlings of both species growth and quality equal or superior compared to the commercial substrate. The use of gravel as an input in the production of native seedlings is feasible, as an alternative for the formation of a sustainable chain in waste management, from the processing of gravel to the recomposition of forests through the planting of seedlings produced with the waste.

Keywords: *Enterolobium contortisiliquum*, *Tabebuia roseoalba*, Cycling, Onshore gravel, Offshore gravel, Petroleum industrial waste.

1. INTRODUÇÃO

Sustentabilidade é o conceito tridimensional mais popular, conhecido por grupos políticos e pela comunidade científica (Forrest et al. 2019; Fito e Van Hulle, 2021). Para um gerenciamento dos resíduos que atendam a legislação, mas também, seja verdadeiramente sustentável, considerando seus três pilares: crescimento econômico + desenvolvimento social + proteção ambiental, o gerenciamento do cascalho deve ser baseado na realidade local (estrutura administrativa, funcionamento, recursos financeiros e legislação pertinente), contemplando os aspectos técnicos, as quantidades e tipologia destes resíduos (Almeida et al., 2017).

Uma abordagem de avaliação das opções de reaproveitamento de resíduos pode ser fundamentada nos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos pela Organização das Nações Unidas (ONU). Os ODS, também conhecidos como Objetivos Globais, foram adotados em 2015 pelos países membros da ONU. Eles têm como premissa orientar as políticas nacionais e atividades de cooperação internacional até 2030, com o objetivo de combater a pobreza, proteger o planeta e garantir a paz e prosperidade (Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento - PNUD, 2023). São compostos por 17 objetivos e 169 metas a serem alcançadas por meio da ação conjunta de diferentes níveis de governo, organizações, empresas e sociedade, nos âmbitos internacional, nacional e local (Confederação Nacional dos Municípios - CNM, 2023). Os ODS, buscam assegurar a integração das dimensões: social, ambiental e econômico, tornando as indústrias parte essencial para sua implementação, já que são grandes detentoras do poder econômico, propulsoras de inovações e tecnologias influenciadoras e engajadora de diversos públicos (governos, fornecedores, colaboradores e consumidores) (Pacto Global, 2023).

Diferentes resíduos são gerados a partir da extração de petróleo e gás, e os mesmos podem apresentar destinações distintas tanto para descarte quanto para a sua reutilização. Dentre os resíduos, o cascalho gerado na perfuração de poços offshore, marítimo, vem se destacando nos debates desde o ano de 2018, quando entrou em vigor a Instrução Normativa Nº 1, de 02 de janeiro de 2018. Sendo um marco regulatório para o uso e descarte de fluídos, cascalhos e pastas de cimento nas atividades de perfuração marítima de poços e produção de petróleo e gás, estabelecendo o Projeto de Monitoramento de Fluídos e Cascalhos, e dá outras providências (IBP, 2021). Uma das exigências da normativa, é a proibição do descarte de fluído e cascalho, aquosos e não aquosos aderidos, gerados durante a perfuração de fases de reservatório (ou zonas produtoras) no mar, sendo a política de descarte zero (IBP, 2021).

Como uma das principais formas de destinação é a descarga offshore (in situ), e o tempo para adequação a nova regra seria relativamente curto, devido a toda complexidade na mudança do gerenciamento do resíduo, órgãos de fiscalização e regulamentação da categoria entraram em divergência jurídica, acarretando a suspensão do “descarte zero”. Porém, foi a sinalização do sentido que a indústria petrolífera deverá caminhar. Com a política do descarte zero em perspectiva, entende-se que haverá um aumento significativo do volume total de cascalho para tratamento e destinação final no continente, podendo gerar maior demanda para a logística e destinação do resíduo, bem como uma maior pressão quanto aos aspectos ambientais (Cruz, 2022). Dessa forma novas maneiras de destinação, preferencialmente as de reciclagem do cascalho offshore, devem ser estudadas e viabilizadas em alternativa as já existentes.

Nesse sentido, a possibilidade de contemplar mais de um ODS em ações e projetos, torna a prática da sustentabilidade mais consistente. Sendo a área florestal, um setor de grande potencial para utilização de resíduos (orgânicos, agropecuários e industriais), implementados na recuperação e proteção do meio ambiente, bem como a inserção da sociedade, seja na conscientização (educação ambiental) ou na geração de trabalho e renda para populações em situação de vulnerabilidade (Abreu et al., 2022).

Acordos internacionais e metas ambiciosas foram estabelecidas em prol do meio ambiente e sustentabilidade do planeta. Dentre eles, o Pacto Pela Restauração da Mata Atlântica estipula a restauração de 15 milhões de hectares do bioma em âmbito nacional (Melo et al., 2013), e na Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (COP 26), a Secretaria do Estado do Rio de Janeiro de Ambiente e Sustentabilidade (SEAS) traçou a meta de restaurar 441 mil hectares de Mata Atlântica até 2050, para que o território fluminense atinja 40% de cobertura florestal (INEA/SEAS, 2022).

A recuperação de florestas e paisagens (RPF) vem se destacando no setor florestal, a fim de conservar a biodiversidade, mitigar alterações climáticas, reforçar a prestação de serviços ecossistêmicos e gerar empregos verdes e rendimentos derivados de uma melhor utilização de terras degradadas (Silva et al., 2017). Para concretização desses empreendimentos florestais e cumprimento das metas, faz-se necessário uma enorme articulação de esforços e recursos, bem como políticas públicas que fomentem a área para consolidação de uma cadeia produtiva consistente, que supra a demanda de insumos florestais com sementes, fertilizantes, substratos e mudas de qualidade que garantam a autossustentabilidade dos projetos de recuperação implementados.

Com foco nos ODS: 9. Indústria Inovação e Infraestrutura, 12. Consumo e Produção Responsáveis, 13. Ação Contra a Mudança Global do Clima, 14. Vida na Água, 15. Vida terrestre e 17. Parcerias e meios de implementação (ONU, 2015). Este capítulo tem por objetivo analisar o potencial do uso de resíduos de perfuração de poços onshore e offshore como condicionadores de substratos para a produção de mudas florestais, e estimar a possibilidade de reciclagem dos cascalhos na produção de mudas florestais nativas em larga escala.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de Estudo e Delineamento Experimental

A condução experimental foi realizada em casa de vegetação telada, com tela aramada, e não climatizada no Departamento de Solos - Instituto de Agronomia da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), Seropédica, RJ. O clima da região é do tipo Aw, identificado como tropical com verão chuvoso e inverno seco, segundo a classificação de Köppen (Alvares et al., 2013), com precipitação média anual de 1.245 mm, sem estação seca definida, e temperatura média anual de 23,7°C (MELO et al., 2018).

Para cada espécie estudada foi constituído um experimento, sendo utilizadas: *Enterolobium contortisiliquum* (Vell.) Morong, popularmente conhecida como Tamboril, representando as espécies do grupo sucessional pioneiras e grupo funcional de preenchimento; e a *Tabebuia roseoalba* (Ridl.) Sandwith, popularmente conhecida como Ipê branco, representando as espécies do grupo sucessional não pioneiras (secundária tardia) e grupo funcional de diversidade. Ambas amplamente utilizadas em plantios de restauração florestal nos biomas Cerrado e Mata Atlântica. O estudo de espécies de diferentes grupos sucessionais, permite avaliar o padrão de resposta de plantas mais sensíveis (pioneiras) e menos sensíveis (não pioneiras) a mudanças nas características físicas e químicas do substrato (Alonso, 2018). As sementes de *E. contortisiliquum* foram doadas pela Companhia Estadual de Águas e Esgotos do Rio de Janeiro (CEDAE), e as sementes de *T. roseoalba* adquiridas em Caiçara Comércio de Sementes Ltda.

Os tratamentos foram comuns as espécies, e para composição destes foram testados três (03) diferentes cascalhos de perfuração de poços de petróleo, sendo: (i) o cascalho *onshore* (ON), (ii) cascalho *offshore* camada pré-sal (OFFPré) e (iii) cascalho *offshore* camada pós-sal (OFFPós). Misturados em três (3) doses crescentes a um substrato comercial (SC), constituindo

as formulações descritas na Tabela 1. Em todos os tratamentos foram adicionados 5 g L⁻¹ de adubo encapsulado de liberação lenta (Forth Cote-NPK 14-14-14) (Figura 1-B).

Para cada espécie, adotou-se o delineamento inteiramente casualizado (DIC) com dez (10) tratamentos, cinco (05) repetições, sendo cada unidade experimental composta por dez (10) mudas, totalizando quinhentas (500) mudas para cada espécie e um mil (1000) mudas avaliadas no total.

Tabela 1: Proporções dos componentes utilizados nas formulações dos tratamentos (substratos) para produção de mudas de *Enterolobium contortisiliquum* e *Tabebuia roseoalba*.

Tratamento	SC*	ON	OFFPré	OFFPós
	%			
1	100,0	-	-	-
2	97,5	2,5	-	-
3	95,0	5	-	-
4	90,0	10	-	-
5	97,5	-	2,5	-
6	95,0	-	5	-
7	90,0	-	10	-
8	97,5	-	-	-
9	95,0	-	-	5
10	90,0	-	-	10

Legenda: SC: substrato comercial; ON: cascalho de perfuração *onshore*; OFFPré: cascalho de perfuração *offshore* pré-sal; OFFPós: cascalho de perfuração *offshore* pós-sal; *Mistura de substrato comercial + 10% de vermiculita.

2.2. Descrição dos componentes dos substratos

Os resíduos de perfuração (cascalhos), foram fornecidos pela empresa Petróleo Brasileiro S.A. (Petrobras). Em que, o cascalho de origem terrestre, denominado como *onshore*, é proveniente de mistura proporcional de todas as fases de perfuração de dois poços da Petrobrás, sendo um da Unidade Operacional da Bahia (UOBA; do poço 7-MGP-98D-BA) e outro a Unidade Operacional de Sergipe e Alagoas (UOSEAL; poço 7-SMC-50D-AL). Os cascalhos de origem marítima, denominados *offshore*, possuem origens e profundidades diferentes. Sendo, o cascalho da camada pré-sal referente ao poço 9-MLL-83-RJS, coletado entre 4.450 e 4.520m de profundidade. E o cascalho da camada pós-sal, referente ao poço 7-MLL-82HA-RJS, coletado a 3.400m de profundidade.

Após recebimento dos resíduos, os cascalhos foram destorroados, moídos em moinho de pedra e passados em peneira com malha de 1 mm (Figura 1- D e E), sendo utilizados em granulometria fina (< 1 mm). Posteriormente, foram realizadas as análises para caracterização química de acordo com o descrito pelo método da USEPA 3050B (USEPA, 1998), sendo determinados os valores pseudototais do macronutrientes, micronutrientes e metais pesados. Devido aos altos teores de Na⁺ presentes nos cascalhos *offshore*, realizou-se um pré-tratamento para diminuição dos teores de Na⁺.

Adotou-se como substrato comercial neste estudo, a mistura de um substrato amplamente utilizado na produção de mudas florestais, sendo o Mecplant® Florestal 3 (Figura 1-A), composto de casca de pinus bioestabilizada, acrescido de 10% do volume total do substrato comercial de vermiculita média (Figura 1-C).

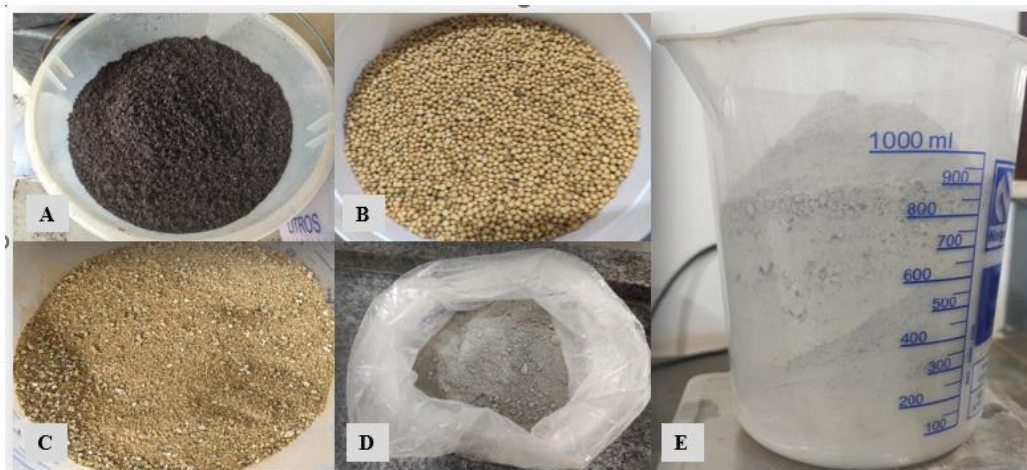


Figura 1 Componentes das formulações de substrato: A - substrato comercial Mecplant; B - adubo de liberação controlada; C - vermiculita; D - cascalho *offshore* pós-sal; E - cascalho *offshore* pré-sal.

2.3. Caracterização dos substratos

Após a homogeneização dos substratos em betoneira, foram retiradas amostras de cada tratamento, antes que fosse adicionado o adubo de liberação controlada no traço, e as mesmas submetidas a caracterização física e química no Laboratório de Substratos na Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). As análises foram realizadas segundo a Instrução Normativa nº 14, de 15 de dezembro de 2004 do Ministério da Agricultura, que estabelece: "Definições e normas sobre as especificações e as garantias, as tolerâncias, o registro, a embalagem e a rotulagem dos substratos para plantas", juntamente com seus anexos e complementos (IN SDA Nº 17, de 21 de maio de 2007 e IN SDA Nº 31, de 23 de outubro de 2008). (MAPA, 2004; 2007; 2008).

Foram avaliados os seguintes atributos: físicos: densidade úmida (DU), densidade seca (DS), umidade atual (UA), porosidade total (PT), espaço de aeração (EA), água disponível (AD), água facilmente disponível (AFD), água tamponante (AT), água remanescente (AR) e capacidade de retenção de água a tensão de 10 cm; e químicos: pH e condutividade elétrica (CE). Também foram determinados os valores pseudototais dos nutrientes (P, K⁺ e Na⁺) pelo método da USEPA 3050B (USEPA, 1998). Bem como, os teores totais de N, segundo Tedesco et al. (1995).

2.4. Produção das mudas

Para a produção das mudas, os recipientes utilizados foram tubetes de 280 cm³, os quais foram dispostos em bandejas plásticas, com capacidade para 54 recipientes, e alocadas em bancadas suspensas. Os tubetes foram preenchidos manualmente, com os substratos correspondentes a cada tratamento, previamente umedecidos, facilitando a acomodação no interior do recipiente. Antes da etapa de semeadura, as sementes de *E. contortisiliquum* foram submetidas a processo pré-germinativo para superação de dormência, sendo imersas em água quente à 80° durante 5 minutos, após, imersas em água gelada por mais 5 minutos (choque térmico).

As mudas de *E. contortisiliquum* e *T. roseoalba* foram produzidas por meio de semeadura indireta, a fim de evitar interferência dos resíduos na germinação, em que as sementes foram dispostas em sementeiras de alvenaria preenchidas com areia lavada e cobertas

com sombrite até a germinação. Após 20 dias da germinação em sementeira, foram selecionadas as plântulas de maior vigor e alturas próximas, e repicadas para os tubetes, sendo realizada uma segunda repicagem 3 dias após a primeira, para substituição das plântulas mortas. A irrigação foi realizada por sistema de microaspersão, três vezes ao dia (início e meio da manhã, e final da tarde), e de acordo com a necessidade das mudas, através de análise visual.

Aos 30 dias após repicagem, realizou-se a realocação (dança) das mudas, modificando o espaçamento nas bandejas, que ficaram com 50%, diminuindo assim a competição por luz e facilitando a chegada de água da irrigação até o substrato. Sempre que verificada a necessidade, por meio de observação, foi realizada a retirada de plantas espontâneas (monda) das mudas.

2.5. Avaliação morfológica

A altura da parte aérea (H) e o diâmetro do coleto (DC) das mudas foram mensurados mensalmente, dos 30 até 120 dias após repicagem, com auxílio de régua graduada (cm) e paquímetro digital (mm), respectivamente. Após as últimas medições, foram selecionadas três mudas aleatoriamente de cada repetição (totalizando 15 mudas por tratamento), evitando as mudas que não estavam no padrão estabelecido para cada tratamento. Determinou-se nas folhas das mudas selecionadas, a clorofila total por meio do aparelho CloroFilog – Falker, e por método destrutivo, a área foliar com o aparelho LI-COR LI-3100-AREA METER.

As mudas foram segmentadas em 3 compartimentos: folhas, coleto e raiz, para avaliação da biomassa. Os compartimentos foram acondicionados em sacos de papel, identificados e levados a estufa com circulação de ar forçada, onde permaneceram a 65°C, durante 96 horas. Em seguida, foram pesadas para determinação da massa de matéria seca da folha (MSF), massa de matéria seca do coleto (MSC), massa de matéria seca da raiz (MSR), pela soma da MSF e MSC a massa de matéria seca da parte aérea (MSPA), e pela soma da MSPA e MSR a massa de matéria seca total (MST).

A partir dos dados obtidos foram calculados os seguintes parâmetros de qualidade: relação altura / diâmetro de coleto (H/DC) – índice de robustez; relação massa de matéria seca da parte aérea / massa de matéria seca de raiz (MSPA/MSR) e o índice de qualidade de Dickson (IQD) (Dickson et al., 1960).

Os compartimentos após pesagem, foram moídos em moinho de facas e reunidas as mudas de cada repetição formando uma amostra composta, posteriormente o material foi pesado para digestão sulfúrica (Tedesco et al., 1995) e digestão nítrica USEPA 3050A (USEPA, 1998), e determinados os teores de nitrogênio total (N), obtidos por oxidação úmida em destilação por arraste a vapor; fósforo (P) por espectrofotometria; e sódio (Na) e potássio (K⁺) por fotometria de chama. O acúmulo dos elementos nos compartimentos vegetativos, foi determinado pela relação entre os teores e a massa seca de cada compartimento.

2.6. Determinação do quantitativo de resíduos (cascalhos) reaproveitados na produção em larga escala

Para o cálculo de prospecção do quantitativo do cascalho que pode ser empregue na produção de mudas em larga escala, utilizaram-se as seguintes premissas:

A) Proporção dos resíduos para produção das mudas de Tamboril e Ipê branco, previamente produzidas nesse estudo (a) 2,5%, (b) 5% e (c) 10%.

B) Com base na meta estabelecida pela Secretaria do Estado do Rio de Janeiro do Ambiente e Sustentabilidade (SEAS) em 2022 na Conferência das Nações Unidas sobre

Mudanças Climáticas (COP 26), de restaurar 441 mil hectares de Mata Atlântica até 2050 para que o território atinja 40% de cobertura florestal. Calculou-se o quantitativo de mudas arbóreas nativas necessárias, considerando que seja adotada apenas a técnica de plantio de mudas florestais como estratégia para restauração, utilizando o espaçamento de plantio de 3x2 metros.

C) As proporções de cascalho utilizadas para as formulações nesse estudo, foram determinadas de acordo com o volume do recipiente empregado na produção (tubete 280 cm³). A partir desses dados, também foram calculados o quantitativo de cascalho para dois recipientes do tipo saco plástico com capacidade volumétrica de 1,4 L e 6,3 L, respectivamente, e prospecção da utilização em larga escala.

2.7. Análise dos dados

Os parâmetros de crescimento e qualidade das mudas, foram submetidos às análises de normalidade (teste de Shapiro Wilk, 5% e teste de Kolmogorov-Smirnov, 5%) e homogeneidade da variância dos erros (teste de Levene, 5%), sendo atendido esses pressupostos, posteriormente foram comparados por análise de variância (5%) e teste Tukey, ao nível de significância de 95%. Foram realizadas análises não paramétricas (teste de Kruskal-Wallis, 95% de significância) nos dados que não atenderam os pressupostos de normalidade e homogeneidade da análise de variância.

O banco de dados das espécies, também foi explorado utilizando análise multivariada, para avaliar a qualidade das mudas, considerando as variáveis morfológicas H, DC, AF, CF, VR, MSPA, MSR, MST, H/DC e IQD. Os tratamentos foram usados como referência para avaliar a distribuição das observações no novo espaço amostral originado pela ACP. A adequação dos dados para análises multivariadas foi testada pelo índice KMO e pelo Teste de Esfericidade de Bartlett. Como o índice KMO apresentou valor de 0,60, optou-se por realizar a análise de componentes principais (ACP) para avaliar o agrupamento de observações e as variáveis. Os resultados da análise de exploratória foram plotados em um PCA. Todos os procedimentos estatísticos foram realizados no *software* IBM SPSS Statistics 20.

3. RESULTADOS

Os resultados apresentados a seguir demonstram que pode ser estabelecido um modelo de gestão sustentável dos resíduos petrolíferos. As análises realizadas tiveram como um dos objetivos específicos, estabelecer qual ou quais seriam o(s) nível(is) adequado(s) do emprego do cascalho na formulação de substratos, mantendo-se as características físicas dos substratos adequadas e promovendo crescimento das mudas.

3.1. Caracterização dos substratos

A caracterização química dos cascalhos *offshore* após tratamento e *onshore* é apresentada na Tabela 2. Segundo a IN nº 14 e IN nº 17, na Tabela 3, são apresentados os parâmetros físicos e químicos comparados entre si e com as classificações estabelecidas para substratos, com base em seus valores numéricos. O substrato comercial (SC – T1) apresentou o menor valor de pH (4,67), já os substratos com cascalho ON (ON 2,5 - T2, ON 5 - T3 e ON 10 - T4) e os substratos com cascalho OFFPós (OFFPós 2,5 – T8, OFFPós 5 – T9 e OFFPós 10 – T10), os valores de pH aumentaram em paralelo concomitante ao aumento da concentração do resíduo na formulação. Os substratos confeccionados com cascalho OFFPré (OFFPré 2,5 - T4, OFFPré 5 - T5 e OFFPré 10 - T6) apresentam valores de pH similares, independente da concentração do resíduo.

Tabela 2. Teores de macronutrientes, micronutrientes e metais pesados dos cascalhos de perfuração.

Elemento (mg kg ⁻¹)	Offshore Pré-Sal	Offshore Pós-Sal	Onshore
Al	6723,55	563,05	-
Ca	187712,97	15102,84	15306,2
Mg	16945,27	4383,24	4358,21
Cu	41,14	2,61	14,53
Fe	26389,35	5897,71	5394,95
Mn	326,42	45,75	205,08
Zn	392,44	18,82	147,77
Pb	4,64	0,83	0,99
Cd	0,1	0,1	ND
Ni	25,23	106,2	2,96
Cr	36,17	85,99	4,53
P	1006,6	3115,3	10220,35
K	9887,3	4690,6	59735,66
Na	3655,5	1077	4495,36

Legenda: ND: Não detectado.

Os menores valores de CE foram determinados no SC (T1), ON 2,5 (T2) e OFFPós 2,5 (T8), estando estes próximos entre si. Tanto os substratos com cascalho ON (ON 2,5 - T2, ON 5 - T3 e ON 10 - T4), quanto com cascalho OFFPré (OFFPré 2,5 - T4, OFFPré 5 - T5 e OFFPré 10 - T6), propiciaram aumento dos valores de CE paralelo ao aumento da dose do resíduo na formulação, sendo o maior valor observado em OFFPré 10 (T7) (Tabela 3). Para os substratos com OFFPós (OFFPós 2,5 - T8, OFFPós 5 - T9 e OFFPós 10 - T10), os valores foram próximos para as formulações T9 e T10, e menor na T8.

A DS de todos os substratos com cascalho (T2 ao T10), aumentou paralelo ao aumento da concentração dos resíduos (Tabela 3), em que as concentrações de 2,5% de cascalho foram os menores valores e próximos ao SC, para o qual foi observado o menor valor de DS. Para o tratamento SC foi verificado a maior PT e para os demais substratos valores na faixa de 82% a 90%. Os valores do EA (macroporos), nos substratos têm comportamento similar a PT, sendo observado para SC o maior valor, e para os demais substratos valores na faixa de 19% a 27%. Já para a CRA₍₁₀₎ (microporos), nos substratos T1 (SC) e T3 (ON 5) foram determinados os menores valores, para as demais formulações os valores estiveram na faixa de 60% a 70% (Tabela 3).

Quanto aos teores dos nutrientes determinados nas formulações (Tabela 4), os maiores teores de N e menores de P e Na⁺ foram verificados para SC. Para os substratos com cascalho OFFPré (OFFPré 2,5 - T4, OFFPré 5 - T5 e OFFPré 10 - T6), foram observados os maiores teores de K⁺ junto ao substrato OFFPós 5 (T9). Nas formulações com cascalho (T2 ao T10), os teores de K⁺ aumentam paralelo ao incremento da dose dos resíduos, sendo os substratos ON (ON 2,5 - T2, ON 5 - T3 e ON 10 - T4) e OFFPré (OFFPré 2,5 - T4, OFFPré 5 - T5 e OFFPré 10 - T6), com os maiores teores. Para os teores dos demais elementos não foram observados grandes variações dos valores entre as formulações.

Tabela 3. Propriedades físicas e químicas dos substratos formulados com diferentes cascalhos de perfuração.

Parâmetro		Substrato			
		1 SC 100%	2 ON 2,5%	3 ON 5%	4 ON 10%
pH	H ₂ O	4,67	5,99	6,11	6,72
CE	mS cm ⁻¹	0,47	0,49	0,61	0,93
DU	kg m ⁻³	546,79	593,7	645,03	696,09
DS	kg m ⁻³	211,63	294,02	346,7	413,79
UA	%	61,29	50,48	46,25	40,56
PT	%	90,83	87,84	85,72	83,21
EA	%	31,2	26,86	26,89	21,51
AFD	%	18,04	19,95	18,05	21,02
AT	%	2,68	2,42	1,84	2,74
AR	%	38,91	38,61	38,93	37,93
CRA ₍₁₀₎	%	59,63	60,97	58,82	61,69

Parâmetro		Substrato			
		1 SC 100%	5 OFFPré 2,5%	6 OFFPré 5%	7 OFFPré 10%
pH	H ₂ O	4,67	7,69	7,7	7,76
CE	mS cm ⁻¹	0,47	0,87	0,92	1,28
DU	kg m ⁻³	546,79	595,96	632,94	673,71
DS	kg m ⁻³	211,63	297,66	337,96	407,2
UA	%	61,29	50,05	46,61	39,56
PT	%	90,83	89,15	86,28	88,66
EA	%	31,2	25,46	20,72	19,57
AFD	%	18,04	20,96	22,62	22,99
AT	%	2,68	2,63	2,55	3,45
AR	%	38,91	40,09	40,39	42,65
CRA ₍₁₀₎	%	59,63	63,69	65,56	69,09

Parâmetro		Substrato			
		1 SC 100%	8 OFFPós 2,5%	9 OFFPós 5%	10 OFFPós 10%
pH	H ₂ O	4,67	5,51	6,26	6,44
CE	mS cm ⁻¹	0,47	0,41	0,63	0,63
DU	kg m ⁻³	546,79	607,3	633,45	724,8
DS	kg m ⁻³	211,63	298,63	341,48	443,09
UA	%	61,29	50,83	46,09	38,87
PT	%	90,83	89,56	84,94	82,41
EA	%	31,2	27,89	22,58	22,08
AFD	%	18,04	19,54	21,1	19,68
AT	%	2,68	2,33	1,42	0,17
AR	%	38,91	39,8	39,84	40,48
CRA ₍₁₀₎	%	59,63	61,67	62,37	60,33

Legenda: SC: substrato comercial; ON: cascalho *onshore*; OFFPré: cascalho *offshore* pré-sal; OFFPós: cascalho *offshore* pós-sal. pH: potencial hidrogeniônico; CE: condutividade elétrica; DU: densidade úmida; DS: densidade seca; UA: umidade atual; PT: porosidade total; EA: espaço de aeração; AD: água disponível; AFD: água facilmente disponível; AT: água tamponante; AR: água remanescente; CRA(10): capacidade de retenção de água a tensão de 10 cm.

Tabela 4. Teores de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K) e sódio (Na⁺), dos substratos formulados com diferentes cascalhos de perfuração.

Nutriente	Substrato			
	1	2	3	4
g kg ⁻¹	SC 100%	ON 2,5%	ON 5%	ON 10%
N	5,287	3,337	2,721	2,053
P	0,010	0,011	0,021	0,018
K	1,127	0,781	0,918	0,991
Na	0,093	0,690	1,236	2,064

Nutriente	Substrato			
	1	5	6	7
g kg ⁻¹	SC 100%	OFFPré 2,5%	OFFPré 5%	OFFPré 10%
N	5,287	3,080	2,361	2,669
P	0,010	0,013	0,016	0,020
K	1,127	1,700	2,058	2,757
Na	0,093	0,573	0,930	1,228

Nutriente	Substrato			
	1	8	9	10
g kg ⁻¹	SC 100%	OFFPós 2,5%	OFFPós 5%	OFFPós 10%
N	5,287	3,285	3,080	2,464
P	0,010	0,013	0,013	0,011
K	1,127	1,231	1,657	0,937
Na	0,093	0,243	0,330	0,220

Legenda: SC: substrato comercial; ON: cascalho *onshore*; OFFPré: cascalho *offshore* pré-sal; OFFPós: cascalho *offshore* pós-sal.

3.2. Avaliação morfológica

Os cascalhos influenciaram nas características morfológicas das duas espécies avaliadas (Tabelas 5 e 6, Figuras 6 e 7). O acompanhamento da altura ao longo de quatro avaliações realizadas para mudas de *T. roseoalba* (Figura 2), mostra um crescimento mais expressivo nos substratos com cascalho ON, OFFPós e no SC. Os substratos com cascalho OFFPré, proporcionaram menor crescimento em altura para as mudas, sendo as mudas que cresceram nos tratamentos T6 (OFFPré 5) e T7 (OFFPré 10) significativamente menores aos 120 dias (Tabela 5). Um maior crescimento das mudas de *E. contortisiliquum*, foi verificado nos tratamentos T9, T8, T1 e T2 (OFFPós 5; OFFPós 2,5; SC; e ON 2,5, respectivamente), Figura 3. De forma similar ao crescimento da *T. roseoalba*, os tratamentos T6 (OFFPré 5) e T7 (OFFPré 10) foram significativamente menores aos 120 dias para o *E. contortisiliquum* (Tabela 5) em H.

Aos 120 dias, verificou-se diferença para o diâmetro de coleto em ambas as espécies (Tabela 5). Tanto para as mudas de *T. roseoalba* e *E. contortisiliquum*, o crescimento foi mais expressivo nos tratamentos OFFPós (T8, T9 e T10), ON (T2, T3 e T4) e SC (T1), sendo os tratamentos com cascalho OFFPré estatisticamente menores em comparação aos demais substratos (Figuras 4 e 5).

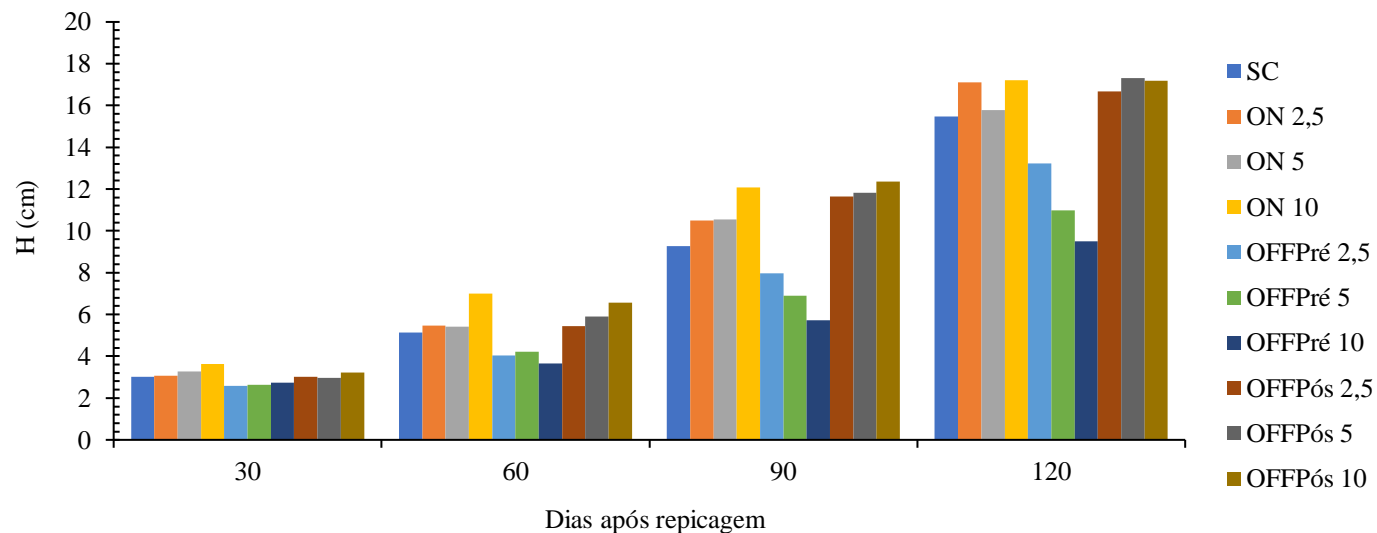


Figura 2. Crescimento em altura (H) dos 30 aos 120 dias após repicagem de mudas de *T. roseoalba* produzidas em diferentes substratos.

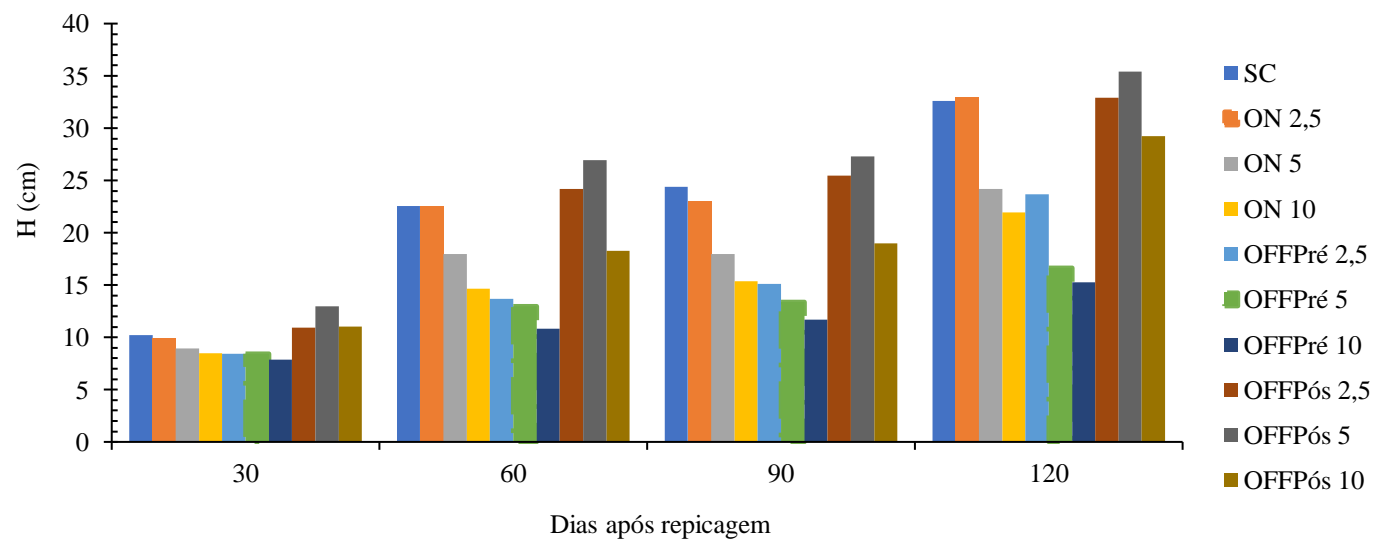


Figura 3. Crescimento em altura (H) dos 30 aos 120 dias após repicagem de mudas de *E. contortisiliquum* produzidas em diferentes substratos.

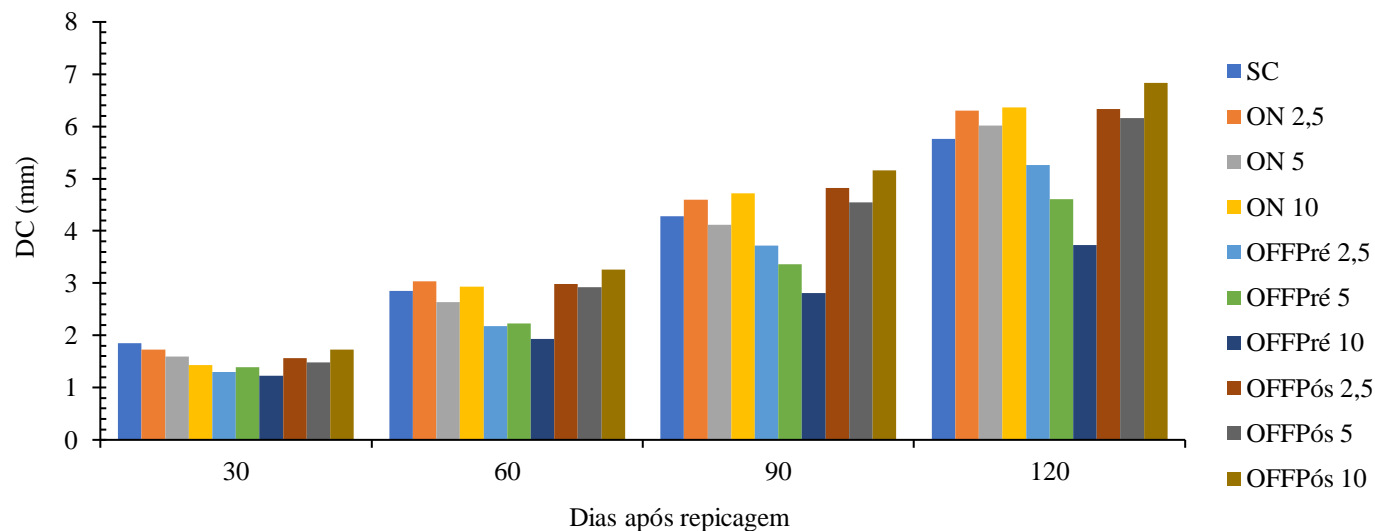


Figura 4. Crescimento em diâmetro de coleto (DC) dos 30 aos 120 dias após repicagem de mudas de *T. roseoalba* produzidas em diferentes substratos.

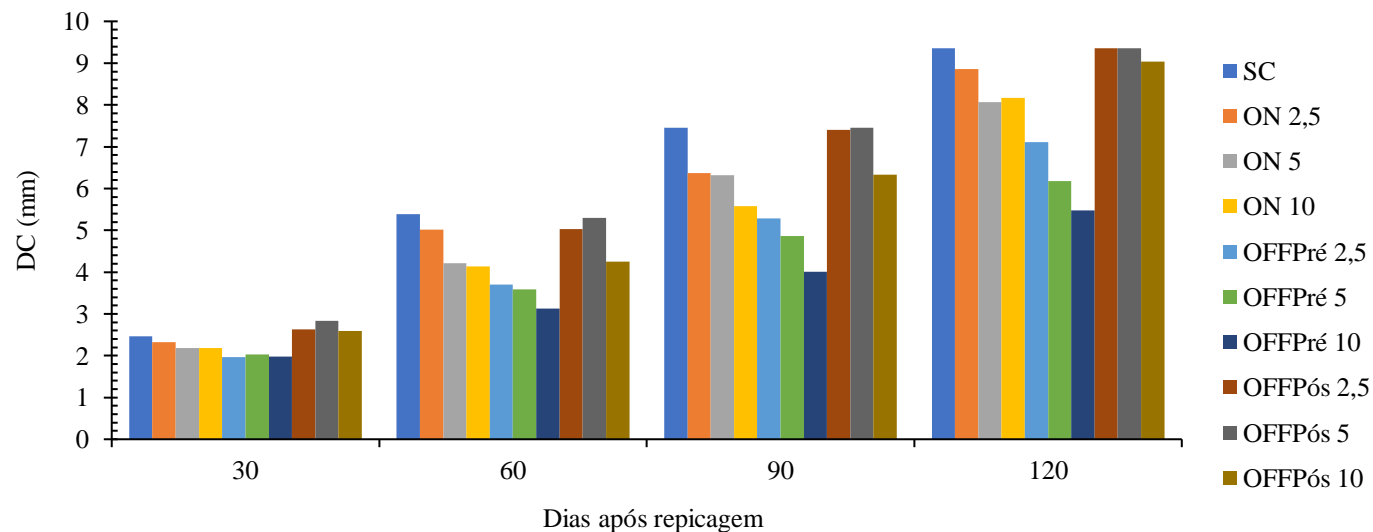


Figura 5. Crescimento em diâmetro de coleto (DC) dos 30 aos 120 dias após repicagem de mudas de *E. contortisiliquum* produzidas em diferentes substratos.

Tabela 5. Valores médios de altura (H), diâmetro de coleto (DC), área foliar (AF), clorofila (CF) e volume de raiz (VR) aos 120 dias após repicagem das mudas de *T. roseoalba* e *E. contortisiliquum* produzidas em diferentes substratos.

<i>Tabebuia roseoalba</i> (Ipê branco)						
Trat.	Composição	H (cm)*	DC (mm)*	AF*	CF*	VR*
	%	120 dias		cm ²	mg m ⁻²	ml
1	SC 100	15,49 _{ab}	5,76 _{bc}	533,08 _a	41,88 _{ab}	13,07 _{abc}
2	ON 2,5	17,10 _{ab}	6,30 _{ab}	547,07 _a	44,14 _a	14,80 _{ab}
3	ON 5	15,78 _{ab}	6,02 _{abc}	415,55 _{ab}	38,28 _{abc}	11,80 _{abc}
4	ON 10	17,21 _a	6,36 _{ab}	416,81 _{ab}	38,28 _{abc}	17,80 _a
5	OFFPré 2,5	13,22 _{ab}	5,27 _{bc}	331,83 _{ab}	37,83 _{abc}	11,47 _{abc}
6	OFFPré 5	10,99 _b	4,61 _{bc}	311,26 _{ab}	35,54 _{bc}	9,33 _{bc}
7	OFFPré 10	9,50 _b	3,72 _c	189,13 _b	31,27 _c	6,20 _c
8	OFFPós 2,5	16,67 _{ab}	6,33 _{ab}	495,53 _a	36,99 _{abc}	13,13 _{abc}
9	OFFPós 5	17,31 _a	6,15 _{abc}	434,83 _{ab}	37,39 _{abc}	12,27 _{abc}
10	OFFPós 10	17,20 _a	6,83 _a	478,89 _a	35,11 _{bc}	15,93 _{ab}

<i>Enterolobium contortisiliquum</i> (Tamboril)						
Trat.	Composição	H (cm)	DC (mm)	AF*	CF*	VR*
	%	120 dias		cm ²	mg m ⁻²	ml
1	SC 100	32,60 _{ab}	9,35 _a	305,30 _a	39,20 _{ab}	21,20 _a
2	ON 2,5	32,93 _{ab}	8,86 _a	322,25 _a	39,90 _{ab}	19,20 _{ab}
3	ON 5	24,20 _c	8,06 _{ab}	255,05 _{abc}	40,32 _{ab}	17,33 _{ab}
4	ON 10	21,93 _c	8,17 _{ab}	220,40 _{abc}	36,58 _{ab}	18,00 _{ab}
5	OFFPré 2,5	23,67 _c	7,11 _{bc}	236,55 _{abc}	32,68 _{ab}	12,93 _b
6	OFFPré 5	16,65 _d	6,18 _{cd}	120,65 _{bc}	29,16 _b	12,33 _b
7	OFFPré 10	15,26 _d	5,47 _d	98,22 _c	28,32 _b	12,60 _b
8	OFFPós 2,5	32,90 _{ab}	9,36 _a	263,55 _{abc}	37,59 _{ab}	22,20 _a
9	OFFPós 5	35,40 _a	9,35 _a	320,52 _a	34,41 _{ab}	18,33 _{ab}
10	OFFPós 10	29,23 _b	9,04 _a	297,19 _{ab}	47,01 _a	17,33 _{ab}

Legenda: Trat. – tratamento; SC - substrato comercial; ON – cascalho *onshore*; OFFPré – cascalho *offshore* pré-sal; OFFPós: cascalho *offshore* pós-sal.

*Valores seguidos de letras diferentes na coluna, diferem entre si (p<0,05), pelo teste de Kruskal-Wallis. Valores seguidos de letras diferentes na coluna, diferem entre si (p<0,05), pelo teste de Tukey.

Quanto as variáveis área foliar (AF), clorofila (CF) e volume de raiz (VR), os tratamentos SC (T1), com cascalho *onshore* (ON 2,5 - T2, ON 5 - T3 e ON 10 - T4) e cascalho *offshore* pós-sal (OFFPós 2,5 – T8 e OFFPós 5 – T9), foram superiores estatisticamente para as mudas de *T. roseoalba*, com exceção do OFFPré 2,5 (T5) para VR, o qual não diferiu dos demais tratamentos (Tabela 5). Para as mudas de *E. contortisiliquum*, os tratamentos com cascalho *onshore* (ON 2,5 - T2, ON 5 - T3 e ON 10 - T4), cascalho *offshore* pós-sal (OFFPós 5 – T9 e OFFPós 10 – T10) e SC (T1), também foram significativamente maiores, com exceção do OFFPré 2,5 (T5) para AF e CF, cujo não apresentou diferença significativa para os demais tratamentos (Tabela 5).

Quanto ao substrato, as mudas de *T. roseoalba* produzidas com cascalho *onshore* (ON 2,5 - T2, ON 5 - T3 e ON 10 - T4), cascalho *offshore* pós-sal (OFFPós 2,5 – T8, OFFPós 5 – T9 e OFFPós 10 – T10) e SC (T1), em geral, apresentaram maior massa seca da parte aérea (MSPA), Tabela 6. Enquanto para massa seca de raiz (MSR) e índice de qualidade de Dickson

(IQD), os maiores valores significativos foram observados nas mudas produzidas nos substratos com cascalho *offshore* pós-sal em todas as doses (OFFPós 2,5 – T8, OFFPós 5 – T9 e OFFPós 10 – T10) e *onshore* nas doses ON 2,5 (T2) e ON 10 (T4), sendo superiores inclusive ao SC (T1). Não foram observadas diferenças significativas para o índice de robustez (H/DC).

Para as mudas de *E. contortisiliquum*, foi verificado o mesmo comportamento para as variáveis MSPA, MSR e IQD (Tabela 6), em que as mudas produzidas nos substratos com cascalho *offshore* pós-sal (OFFPós 2,5 – T8, OFFPós 5 – T9 e OFFPós 10 – T10), cascalho *onshore* (ON 2,5 - T2, ON 5 - T3 e ON 10 - T4), cascalho *offshore* pré-sal (OFFPré 2,5 – T5) e no SC (T1), foram significativamente superiores, em detrimento das mudas produzidas com cascalho OFFPré 5 (T6) e OFFPré 10 (T7). Já para o índice H/DC (robustez), o comportamento foi igual ao observado para as variáveis anteriores, com exceção para o substrato ON 10 (T4), que também foi significativamente menor ($p < 0,05$).

Tabela 6. Valores médios de massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca de raiz (MSR), massa seca total (MST), índice de robustez (H/DC) e índice de qualidade de Dickson (IQD) aos 120 dias após repicagem das mudas de *T. roseoalba* e *E. contortisiliquum* produzidas em diferentes substratos.

<i>Tabebuia roseoalba</i> (Ipê branco)						
Trat.	Composição	MSPA	MSR	MST*	H/DC*	IQD
	%	g				
1	SC 100	3,02 _{ab}	1,30 _{ab}	4,32 _{abc}	2,91 ^a	0,83 _{bcd}
2	ON 2,5	3,42 _a	1,83 _a	5,25 _a	2,84 ^a	1,10 _{abc}
3	ON 5	3,06 _{ab}	1,02 _{ab}	4,08 _{abc}	3,01 ^a	0,67 _{cde}
4	ON 10	2,85 _{ab}	2,14 _a	4,99 _{ab}	2,86 ^a	1,22 _{ab}
5	OFFPré 2,5	2,11 _{ab}	1,05 _{ab}	3,16 _{abc}	2,64 ^a	0,64 _{cde}
6	OFFPré 5	1,43 _b	1,03 _{ab}	2,46 _{bc}	2,56 ^a	0,57 _{de}
7	OFFPré 10	1,27 _b	0,56 _b	1,84 _c	2,69 ^a	0,36 _e
8	OFFPós 2,5	2,99 _{ab}	1,51 _{ab}	4,50 _{abc}	2,86 ^a	0,93 _{abcd}
9	OFFPós 5	2,67 _{ab}	1,92 _a	4,59 _{abc}	2,86 ^a	1,08 _{abc}
10	OFFPós 10	2,81 _{ab}	2,23 _a	5,04 _{ab}	2,66 ^a	1,30 _a
<i>Enterolobium contortisiliquum</i> (Tamboril)						
Trat.	Composição	MSPA*	MSR*	MST*	H/DC*	IQD*
	%	g				
1	SC 100	5,79 _{ab}	3,60 _a	9,38 _a	3,62 _{ab}	1,85 _a
2	ON 2,5	5,25 _{abc}	2,90 _{abc}	8,15 _{ab}	3,75 _a	1,48 _{abc}
3	ON 5	3,96 _{abc}	2,26 _{abc}	6,22 _{ab}	3,04 _{abcd}	1,34 _{abc}
4	ON 10	3,80 _{abc}	2,34 _{abc}	6,14 _{ab}	2,69 _d	1,43 _{abc}
5	OFFPré 2,5	3,62 _{abc}	2,14 _{abc}	5,77 _{ab}	3,55 _{abc}	1,17 _{abc}
6	OFFPré 5	2,03 _{bc}	1,46 _{bc}	3,49 _b	2,75 _{cd}	0,86 _{bc}
7	OFFPré 10	1,68 _c	1,35 _c	3,04 _b	2,81 _{bcd}	0,76 _c
8	OFFPós 2,5	6,49 _a	3,47 _a	9,95 _a	3,53 _{ab}	1,85 _a
9	OFFPós 5	8,97 _a	3,51 _a	12,48 _a	3,80 _a	1,89 _a
10	OFFPós 10	5,52 _{ab}	3,15 _{ab}	8,67 _{ab}	3,24 _{abcd}	1,74 _{ab}

Legenda: Trat. – tratamento; SC - substrato comercial; ON – cascalho *onshore*; OFFPré – cascalho *offshore* pré-sal; OFFPós: cascalho *offshore* pós-sal.

*Valores seguidos de letras diferentes na coluna, diferem entre si ($p < 0,05$), pelo teste de Kruskal-Wallis. Valores seguidos de letras diferentes na coluna, diferem entre si ($p < 0,05$), pelo teste de Tukey.

Tabebuia roseoalba (Ipê branco)

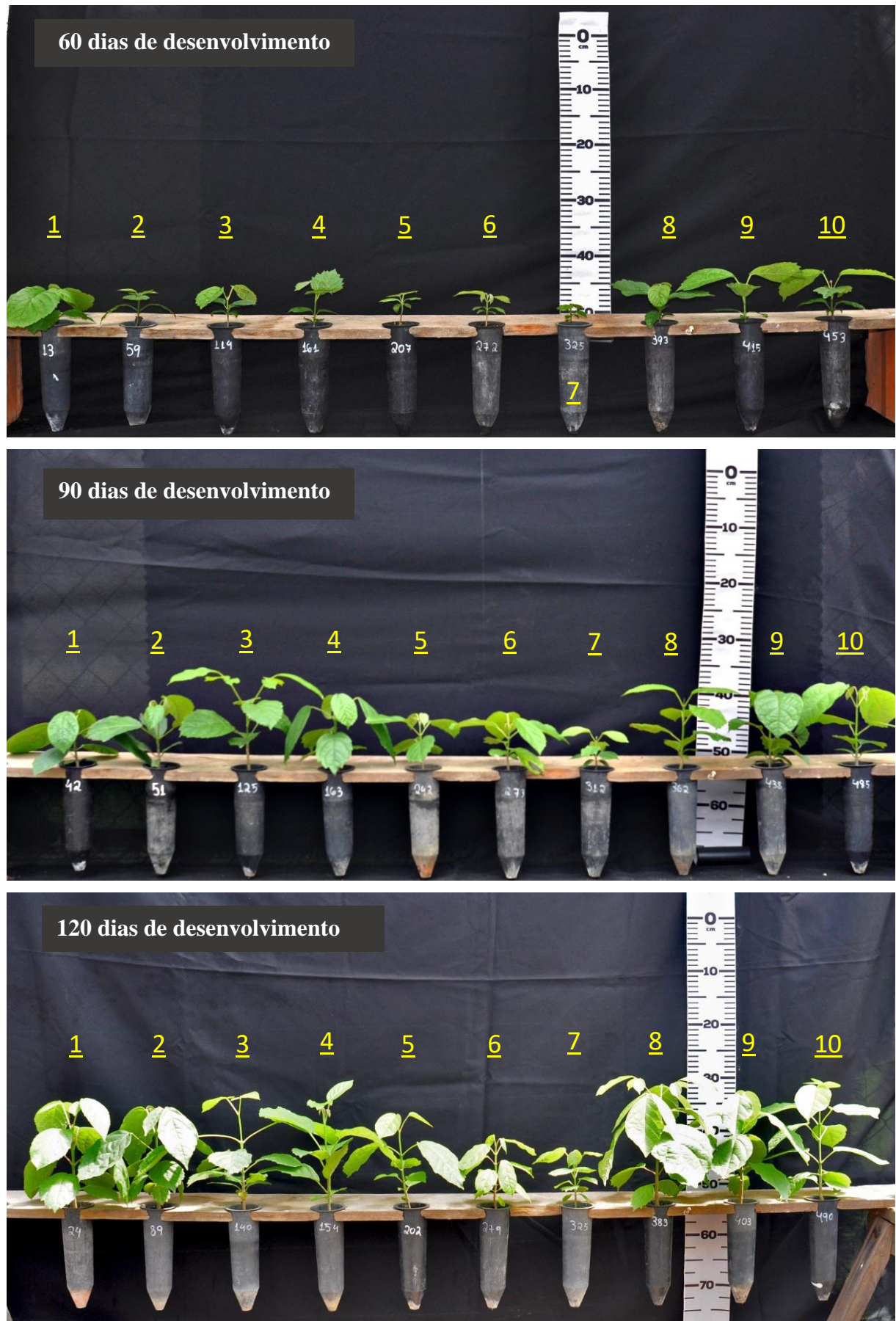


Figura 6. Mudanças de *T. roseoalba* representativas das alturas médias de cada tratamento (T1 ao T10), produzidas em diferentes substratos com cascalho de perfuração aos 90, 60 e 120 dias após repicagem.

Enterolobium contortisiliquum (Tamboril)



Figura 7. Mudas de *E. contortisiliquum* representativas das alturas médias de cada tratamento (T1 ao T10), produzidas em diferentes substratos com cascalho de perfuração aos 90, 60 e 120 dias após repicagem.

Através da análise de ACP (Figura 8) verifica-se que 83% da variância dos dados é explicada por dois eixos, demonstrando a capacidade do método em auxiliar a explicação dos dados. As variáveis H, DC MSR, MST, MSPA e IQD formaram um grupo bem definido entre o quadrante superior e inferior direito. As variáveis H, DC MSR e MST agruparam-se no quadrante inferior, com correlação positiva com CP1 e negativa com CP2, e MSPA e IQD inseridas no quadrante superior com correlação positiva com CP1 e CP2. Já as demais variáveis (AF, CF, VR e H/DC), distribuíram-se mais afastadas das variáveis com grupo bem definido, em que AF e CF localizaram-se no quadrante superior direito com correlação positiva com CP1 e CP2, já VR e H/DC no quadrante superior esquerdo com correlação negativa com CP1 e positiva com CP2 (Figura 8-A).

As observações são apresentadas na Figura 8-B, em que os números de 1 a 50 correspondem as mudas da espécie *E. contortisiliquum*, e de 51 a 100 as mudas de *T. roseoalba*. As observações, para ambas as espécies foram distribuídas em três quadrantes de forma similar, um primeiro grupo composto pela maioria das observações, o segundo grupo menor e um terceiro grupo com apenas duas observações (Figura 8-B). A *T. roseoalba* apresentou o seu primeiro grupo, constituído pelas mudas dos tratamentos T1 (SC), T2, T3 e T4 (ON 2,5; ON 5 e ON 10), T5 (OFFPré 2,5), T8, T9 e T10 (OFFPós 2,5; OFFPós 5; e OFFPós 10), localizadas no quadrante superior esquerdo com correlação negativa com CP1 e positiva com CP2. O segundo grupo, constituído pelas mudas dos tratamentos T6 (OFFPré 5) e T7 (OFFPré 10), no quadrante inferior esquerdo apresentando correlação negativa com CP1 e CP2. O terceiro grupo, constituído por uma do T2 (ON 2,5) e a outra do T4 (ON 10).

O *E. contortisiliquum* (Figura 8-B), teve o seu primeiro grupo constituído pelas mudas dos tratamentos T1 (SC), T2, T3 e T4 (ON 2,5; ON 5; e ON 10), T8, T9 e T10 (OFFPós 2,5; OFFPós 5; e OFFPós 10), localizadas no quadrante inferior direito com correlação positiva com CP1 e negativa com CP2. O segundo grupo, constituído pelas mudas dos tratamentos T5, T6 e T7 (OFFPré 2,5; OFFPré 5; e OFFPré 10), no quadrante inferior esquerdo apresentando correlação negativa com CP1 e CP2. O terceiro grupo, formado por duas mudas, uma muda do T8 (OFFPós 2,5) e a outra do T10 (OFFPós 10).

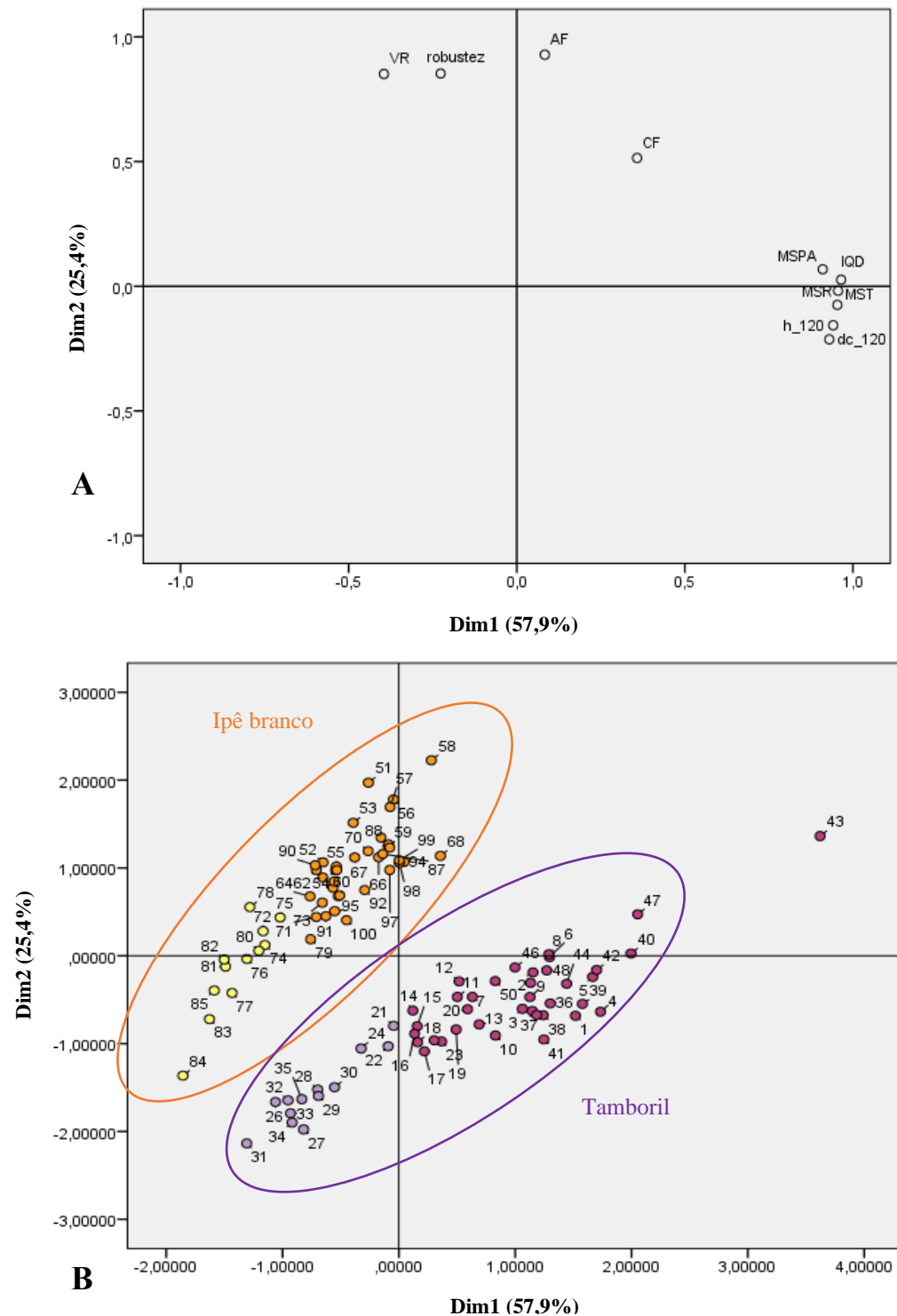


Figura 8. Análise de componentes principais de mudas de *T. roseoalba* e *E. contortisiliquum* aos 120 dias após repicagem produzidas em diferentes substratos com cascalhos de perfuração: **A** - Gráfico de *loading*; **B** - Gráfico de *scores*.

3.4. Estimativa do quantitativo de resíduo (cascalho) a ser reaproveitado na produção em larga escala

Para a reciclagem do cascalho na produção de mudas nativas em larga escala, a estimativa da quantidade de material a ser utilizado nos substratos levou em consideração os valores descritos no item material e métodos, incluindo desde as doses de cascalho que proporcionaram melhor crescimento para as mudas, e a simulação do quantitativo de mudas necessárias para restauração de áreas do bioma Mata Atlântica no Estado do Rio de Janeiro até 2050.

Na Tabela 7, foram descritas as quantidades totais de cascalho a serem reutilizados na produção para três recipientes diferentes, sendo o tubete e dois sacos plásticos com diferentes volumes, considerando que diferentes espécies arbóreas teriam tolerância ao cascalho semelhante das espécies aqui estudadas (*T. roseoalba* e *E. contortisiliquum*). Em que, a estimativa para menor dose (2,5%) vai de 10.290 ton de cascalho utilizando tubetes de 280cm³, até 231.525 ton de cascalho utilizando sacos plásticos de 6300cm³. Já para a maior dose do resíduo (10%) esse valor vai de 39.690 a 893.025 ton de cascalho.

Tabela 7. Estimativa da quantidade de cascalho de perfuração a ser reciclado na produção de mudas arbóreas em três recipientes, destinadas a restauração da Mata Atlântica no estado do RJ até 2050 (INEA, 2022).

Recipiente	Proporção Cascalho	Área Total	Total de Mudanças	Cascalho
	%	ha	unidade	ton
Tubete 280cm ³	2,5	441 Mil	73.500.000*	10.290
	5			20.580
	10			39.690
Saco plástico 1400cm ³	2,5			51.450
	5			102.900
	10			198.450
Saco plástico 6300cm ³	2,5			231.525
	5			463.050
	10			893.025

4. DISCUSSÃO

A caracterização de uma formulação de substrato é essencial para a decisão do manejo no viveiro, principalmente quantos aos aspectos relacionados à irrigação, adubação e ao recipiente a ser utilizado na produção, bem como no atendimento das especificidades das espécies a serem produzidas, quanto a disponibilidade de água, nutrientes e impedância mecânica para o desenvolvimento das raízes. Nesse estudo, a caracterização se faz necessária, sobretudo pela granulometria do resíduo utilizado ser em fina associado a um recipiente de pequena capacidade (tubete 280cm³), cuja associação não é indicada para produção, devido ao aumento da densidade do meio (Schäfer, 2004; Wendling et al. 2007). Partiu-se da premissa de que os cascalhos, em proporções controladas, associados a materiais de maior granulometria, não comprometeriam os parâmetros físicos das formulações e contribuiriam quimicamente para o desenvolvimento das espécies.

Através da análise dos valores de pH dos substratos (Tabela 3), foi possível verificar a alteração química proporcionada pelos cascalhos ao meio. O aumento de pH proporcionado pelos cascalhos ON (ON 2,5 - T2, ON 5 - T3 e ON 10 - T4) e OFFPós (OFFPós 2,5 - T8, OFFPós 5 - T9 e OFFPós 10 - T10), enquadram os substratos na faixa adequada de 5,0 - 6,5 (Kratz e Wendling, 2016), enquanto para SC (T1) foram constatados menores valores (4,67), e para o cascalho OFFPré (OFFPré 2,5 - T4, OFFPré 5 - T5 e OFFPré 10 - T6) valores mais elevados (> 7). Os valores de pH verificados nos tratamentos com cascalho OFFPré, possivelmente ocasionaram fitotoxicidade ou pode ter diminuído a disponibilidade de alguns nutrientes para as mudas em especial os micronutrientes (Regan, 2014).

Com exceção do substrato OFFPré 10 (T7), todos os demais situam-se dentro do limite de 1 dS m^{-1} de condutividade elétrica (CE), valor recomendado para substratos utilizados na produção de mudas florestais (Gonçalves et al., 2000). A CE indica a salinidade do meio, que segundo Zapata et al. (2005), pode ser reduzida através da irrigação do substrato, pois os sais tendem a serem dissociados e lixiviados com excesso de água.

O peso do substrato é um fator diferencial para manipulação das mudas no viveiro, no transporte e deslocamento em campo (Kratz et al., 2013; Alonso, 2018), sendo avaliado através do parâmetro de densidade. Os substratos com adição de cascalho estão no intervalo de $0,25 - 0,50 \text{ Mg m}^{-3}$, classificados como médios, e o substrato comercial possui $\text{DS} < 0,25 \text{ Mg m}^{-3}$, classificado como baixo (Wendling e Gatto, 2002). Além de influenciar nas operações realizadas no viveiro a densidade também influencia no desenvolvimento radicular, ao passo que, formulações de substratos com densidade baixa, podem ocasionar problemas como o tombamento das mudas devido à dificuldade para as raízes se fixarem (Ferraz et al., 2005), impossibilitando a formação de um torrão adequado para plantio.

Apenas os substratos ON 5 (T3), ON 10 (T4), OFFPós 5 (T9) e OFFPós 10 (T10) estão na faixa adequada de 75 - 85% para porosidade total, todos os demais estão acima dos valores considerados adequados (Gonçalves e Poggiani, 1996). Para o espaço de aeração (EA - macroporosidade), todos estão abaixo da faixa recomendada de 35 - 45%, já quanto à capacidade de retenção de água a 10 cm de tensão (CRA_{10} - microporosidade) todos situam-se acima do recomendado, 20 - 30% (Gonçalves e Poggiani, 1996).

A adição do cascalho nas formulações aumentou os valores de DU, DS, CRA_{10} e promoveu a diminuição do EA e PT, comportamento ocasionado pela adição do material mais fino (Schäfer, 2004; Wendling et al. 2007; Kratz e Wendling, 2016). Diferindo deste padrão, destaca-se o substrato comercial no qual apesar de ter apresentado o mesmo comportamento verificado para os com cascalhos, não foi classificado como adequado quanto a PT. Esse comportamento demonstra que as avaliações dos parâmetros devem ser realizadas em conjunto, pois uma alta CRA_{10} associada ao baixo EA, pode dificultar a infiltração e drenagem da água de irrigação no substrato, provocando deficiência de oxigênio (Schafer et al., 2015; Higashikawa et al., 2016; Alonso, 2018).

Existem diferentes literaturas que estabelecem faixas adequadas para os parâmetros físicos e químicos (Boodt e Verdonck, 1972, Gonçalves e Poggiani, 1996, Gonçalves et al., 2000, Kämpf, 2005, Regan, 2014 e Kratz e Wendling, 2016), sendo verificado que entre estas existe divergência para algumas características, sendo outras similares, fazendo com que a tomada de decisão, de qual classificação melhor se aplica e a proporção do material a ser utilizado, seja do produtor levando em consideração as faixas de características necessárias para o desenvolvimento adequado das espécies a serem produzidas.

Através da análise dos parâmetros selecionados, de forma geral verifica-se que os substratos formulados com cascalhos apresentaram resultados semelhantes ao substrato comercial ou mais adequados. Dentre os substratos com cascalho, as formulações com cascalho *onshore* e *offshore* pós-sal, apresentaram resultados de pH, CE, DS e PT adequados para a

utilização como substrato. Os dados de crescimento das mudas, discutidos a seguir, corroboram com esses resultados.

Validando as interpretações realizadas na caracterização dos substratos, as espécies responderam positivamente a adição do cascalho *onshore* e *offshore* pós-sal na formulação dos substratos, mesmo com padrões de crescimento distintos, que são inerentes as características de espécies florestais distintas.

Analisando os parâmetros de crescimento e qualidade avaliados, verifica-se que as espécies apresentaram comportamento similar para área foliar (AF), clorofila (CF), volume de raiz (VR), massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca de raiz (MSR) e massa seca total (MST) (Tabelas 5 e 6, Figuras 6, 7 e 8). Os tratamentos com cascalho *onshore*, *offshore* pós-sal, *offshore* pré-sal 2,5% e substrato comercial proporcionaram os maiores valores médios. Sendo que para as mudas de *T. roseoalba*, o substrato OFFPré 5 (T6) não se diferenciou dos tratamentos com cascalho ON, OFFPós e do SC para AF e MSR.

Com relação as variáveis altura (H), diâmetro de coleto (DC), índice de robustez (H/DC) e índice de qualidade de Dickson (IQD), constatou-se comportamento diferenciado entre as espécies. As mudas de *T. roseoalba*, demonstraram boa adaptação a incorporação de cascalho, sendo os maiores valores de H e DC, nos tratamentos com cascalho *onshore* e *offshore* pós-sal, em contrapartida o *E. contortisiliquum*, apresentou o melhor desenvolvimento nos substratos com cascalho *offshore* pós-sal, substrato comercial e com a menor dose de cascalho *offshore* pré-sal (OFFPré 2,5 – T3), sendo verificadas diferenças ecofisiológicas entre as espécies, quanto a tolerância dos elementos potencialmente tóxicos (Silva et al., 2019) contidos nos resíduos.

Na caracterização dos cascalhos (Tabela 2), pode-se observar que o cascalho OFFPré possui teores elevados de Al, Cu, Fe, Mn, Zn e Pb, principalmente quando comparado ao cascalho OFFPós. Já o cascalho OFFPós, possui altos teores de Ni e Cr e o cascalho ON altos valores de P, K, Na, Mn e Zn. Possivelmente, o aumento das doses dos resíduos no substrato foi excessivo para o *E. contortisiliquum*, ultrapassando sua capacidade de tolerância para Al, Cu, Fe, Mn, Zn e Pb.

Silva et al. (2018), observam a resposta de desenvolvimento das mudas de *E. contortisiliquum*, em estudos sobre crescimento e tolerância de mudas de *Enterolobium contortisiliquum* cultivadas em solo contaminado com zinco, constatando aumento na H e DC nas mudas com doses de 232 e 212,5 mg de Zn kg⁻¹ de solo, e uma redução de 23,3 e 19,8% (H e DC, respectivamente) na maior dose de Zn. Enquanto, estudos produzindo mudas de *T. roseoalba* com rejeito de cobre, Silva et al. (2021), verificam que a espécie possui capacidade de translocar os metais em seus compartimentos aéreos e radiculares, conferindo as características de hiperacumulação e fitoextração da planta.

Considerando que o IQD, é um dos índices mais completos para avaliação da qualidade de mudas florestais, pois pondera os resultados de vários parâmetros para avaliação da qualidade em sua fórmula, sendo índice de robustez (relação H/DC) e o equilíbrio da distribuição da biomassa na muda (massa seca total e relação MSPA/MSR) (Caldeira et al., 2008; Abreu et al., 2019). Sua determinação e interpretação, permite inferir sobre o equilíbrio entre os compartimentos da muda (parte aérea e raiz). Os valores de IQD determinados para *T. roseoalba*, refletem o desenvolvimento da espécie ao longo dos 120 dias (Tabela 6), em que os substratos ON 2,5 (T2), ON 10 (T4), OFFPós 2,5 (T8), OFFPós 5 (T9) e OFFPós 10 (T10) proporcionaram maior qualidade para as mudas (IQD: 1,10, 1,22, 0,93, 1,08 e 1,30, respectivamente). Para o *E. contortisiliquum*, apenas os substratos OFFPré 5 (T6) e OFFPré 10 (T7), proporcionaram baixo IQD (0,86 e 0,76, respectivamente), e os demais substratos proporcionaram valores de 1,17 a 1,89.

Os resultados de IQD são ratificados pela análise ACP (Figura 8), sendo verificada uma tendência das mudas de menor qualidade de ambas as espécies, estarem mais afastadas dos

parâmetros que indicam qualidade. Ressalta-se a necessidade de atenção ao interpretar o IQD, pois como o índice reflete o equilíbrio entre a biomassa produzida na parte aérea e a biomassa produzida nas raízes, uma muda pode estar em equilíbrio mesmo sendo pequena, ou seja, não refletindo qualidade para plantio desta muda.

Em estudos de produção de mudas de *Enterolobium contortisiliquum* e partição de assimilados em resposta à adubação fosfatada e inoculação com fungos micorrízicos, Leite et al. (2017), observaram valores de IQD aos 98 dias variando de 0,4 a 0,9, sendo o maior IQD referente a maior dose de P (200 mg kg⁻¹). Abreu et al. (2015), produzindo mudas de *E. contortisiliquum* em diferentes recipientes, determinou IQD de 0,66 e 0,49 aos 150 dias de produção em tubetes de 280 cm³ e 180 cm³, respectivamente. Ambos os estudos determinaram IQD para *E. contortisiliquum*, próximos as mudas de menor qualidade produzidas nesse estudo, T6 e T7 (Tabela 6).

Analisando doses de esterco bovino e equino no crescimento inicial de mudas de ipê-branco, após 90 dias de produção, Vieira et al. (2022), observaram IQD de 0,13 a 0,40 para mudas produzidas em sacos plásticos (30 cm x 40 cm). Enquanto Silva et al. (2021), produzindo mudas de Ipê-branco em substratos alternativos a base de rejeito de cobre e matéria orgânica, após 80 dias de desenvolvimento verificaram valores de IQD de 0,036 a 0,190. Comparando os valores de IQD encontrados na literatura, com as maiores médias das mudas de *T. roseoalba* aqui produzidas (0,93 a 1,30), nota-se a influência positiva dos cascalhos ON e OFFPós no crescimento das mudas, já que ambos proporcionaram os altos valores de IQD.

De maneira geral, pode-se inferir que o cascalho *onshore* e *offshore* pós-sal contribuíram positivamente para o crescimento das mudas, independente da espécie. Através da análise das Figuras 6 e 7, verifica-se que as mudas com cascalho ON e OFFPós no substrato, apresentaram qualidade visivelmente superior aquelas dos substratos com cascalho OFFPré, além de serem similares ou superiores as produzidas com 100% de substrato comercial. Outro ponto a ser considerado, é em relação a coloração das folhagens das mudas, refletida no teor de clorofila determinado nas espécies. Observa-se coloração verde escura, característica de mudas bem nutridas nos tratamentos ON e OFFPós em comparação as produzidas com cascalho OFFPré. Associando esses resultados as demais características, pode-se recomendar os cascalhos de perfuração *onshore* e *offshore* pós-sal como materiais que promovem qualidade e crescimento adequado para mudas florestais.

A integração entre os pilares da sustentabilidade se dá através da comprovação da viabilidade técnica de um novo produto com cascalho de perfuração em sua composição, associado a integração dos setores social-econômico em sua cadeia produtiva. A qualidade das mudas produzidas com cascalho *onshore* e *offshore* pós-sal, observada nesse estudo, não só constata sua contribuição no crescimento das mudas (Tabela 5 e 6, Figuras 6 e 7), mas também provoca uma releitura do resíduo como coproduto, podendo este ser implementado como insumo na produção de mudas, e mantendo de forma adequada os parâmetros técnicos requeridos pelos produtores de mudas.

Para os tratamentos T2, T8, T9 e T10 (ON 2,5, OFFPós 2,5, OFFPós 5 e OFFPós 10, respectivamente) para as mudas de *E. contortisiliquum*, foi verificado padrão de qualidade de mudas exigidas para utilização na restauração florestal, sendo altura mínima de 25 a 30 cm (Moraes et al., 2013) e diâmetro de coleto mínimo de 5 mm (Gonçalves et al., 2000). Permitindo simular o potencial de reciclagem dos cascalhos, inferindo o quanto poderá ser aproveitado se empregado como insumo para composição de substratos na produção de mudas em larga escala (Tabela 7).

Ressalta-se que, a espécie *T. roseoalba* é classificada como secundária tardia a clímax, ou seja, possui desenvolvimento mais lento (Silva et al., 2021), principalmente em comparação ao *E. contortisiliquum* que é uma espécie pioneira de crescimento rápido (Abreu et al., 2015). Sendo assim, apesar das mudas de *T. roseoalba* não terem atingido valores médios de 25 cm de

altura, em todos os tratamentos que as mudas apresentaram maior altura, continham mudas de até 30 cm, desenvolvimento esperado para espécies não-pioneiras, considerando que aos 150 dias após repicagem, as mudas dos tratamentos com cascalho *onshore* e *offshore* pós-sal, estariam com altura ideal para plantio em campo.

Essa perspectiva, do que pode ser alcançado com o aproveitamento dos resíduos, é vital para um processo de tomada de decisão apoiada na análise da sustentabilidade. Visto que, o estabelecimento de critérios de desempenho relevantes e um procedimento de comparação baseado em métricas quantitativas, devem ser considerados na escolha das alternativas de processamento, para adoção de ações mais eficientes em direção à sustentabilidade (Almeida et al., 2017).

Considerando os valores da capacidade de incorporação em substratos para a produção de mudas descritos na Tabela 7, existe a possibilidade de reciclagem do cascalho ultrapassar as 39.690 toneladas, utilizando a maior dose (10%) vista nesse trabalho. Proporcionando uma via direta de transformação de resíduo em coproduto, e tendo capacidade de alcançar, pelas formulações estabelecidas, uma produção maior que 700 milhões mudas para a restauração florestal da Mata Atlântica.

Quando extrapolados para recipientes de maior volume, como por exemplo sacos plásticos de 1400 cm³ e 6300 cm³, os valores chegam a 198.450 ton e 893.025 ton, respectivamente. Números relevantes, principalmente quanto ao cascalho offshore, já que 93,4% dos 2,4 milhões de barris de óleo equivalente por dia (boe/dia) produzidos no Brasil vem de campos offshore (ANP, 2016). Ressalta-se que, esses valores são uma estimativa apenas para o estado do RJ e bioma Mata Atlântica, esses valores podem aumentar consideravelmente se extrapolados para outros biomas e/ou mesmo para a meta de 15 milhões de hectares até 2050 estabelecido no Pacto Pela Restauração da Mata Atlântica (ONU, 2015; Silva et al., 2017).

A partir do exposto, verifica-se o potencial do emprego do cascalho na produção de mudas florestais. É de suma importância enfatizar que, diversas destinações de aproveitamento devem ser adotadas como estratégia para dar vazão ao volume de resíduo gerado. Sobre tudo para os cascalhos que não atendam às exigências de determinado uso, como observado neste estudo, em que o cascalho *offshore* pré-sal, possuiu relação negativa com o desenvolvimento das mudas de *T. roseoalba* e *E. contortisiliquum* (Tabela 6).

Avaliando os efeitos de diferentes doses de cascalho de perfuração associados a torta de girassol, no cultivo do girassol e nos atributos do solo, Ribeiro et al. (2022), indicam a dose com 45 Mg ha⁻¹ de cascalho, para maior crescimento das plantas e melhoria na fertilidade do solo após cultivo. Os autores também ressaltam, ser necessário estudos de longo prazo para entender o efeito cumulativo do cascalho sobre os atributos químicos do solo e produção de culturas.

Com a finalidade de reutilização do cascalho na pasta de cimentação primária para poços de petróleo (Almeida Neto, 2017), estabelece que é possível uma incorporação de 10% (9,40 lb_m) de cascalho em sua composição sem alterações significativas nas propriedades da pasta, sendo reciclados 0,632 Mg (632 kg) a cada 148,38 lb_m de pasta formulada. Meneses e Paula (2015), citam o emprego do cascalho de perfuração na fabricação de material cerâmico, em que, são obtidos tijolos maciços para alvenaria e blocos cerâmicos para alvenaria de vedação de acordo com as normas exigidas pela ABNT (Medeiros, 2010), contribuindo para atenuação do problema ambiental de destinação do resíduo, como para a redução dos custos de materiais na indústria da construção civil incorporando 5% e 10% de cascalho nas formulações.

Diante das diversas possibilidades de reaproveitamento do cascalho, o olhar como coproduto surge de forma estratégica, podendo inclusive, auxiliar na mais recente crise de insumos agrícolas (Gaudarde, 2023), enfrentada em diversos países. O direcionamento dos cascalhos que contribuem quimicamente para o desenvolvimento de plantas, seja na formulação de substratos, adubos ou condicionadores de solo (Silva et al., 2020; Ribeiro et al., 2022; Cruz,

2022), para os setores ligados a produção agrícola, e os cascalhos que contribuem negativamente no desenvolvimento vegetal, para os setores que não sejam prejudicados pela sua composição (Meneses e Paula, 2015; Almeida et al., 2017; Almeida Neto, 2017), possibilita a capacidade de atender a demanda de diversas indústrias, bem como, diminuir consideravelmente as quantidades de resíduos descartados de formas menos adequadas ambientalmente.

O emprego do cascalho na produção de mudas em larga escala, possibilita a associação de duas ações que somam no compromisso da busca de uma economia de baixo carbono, sendo a reciclagem dos resíduos como ação de mitigação e a utilização das mudas em plantios de restauração florestal, ação de compensação pelo sequestro e estoque de carbono realizado pelas árvores. Ressalta-se que só no ano de 2019, a queima de combustíveis fósseis emitiu 388 Mt de gases de efeito estufa (GEE) no Brasil (IEMA, 2020).

A compensação ambiental através de plantios florestais, considera que os plantios de restauração serão devidamente assistidos, alcançando o objetivo de recompor a vegetação da área manejada. Outro quesito importante a ser considerado, é o princípio do sequestro de carbono, que reside na compensação de um dano já causado, tornando uma única intervenção insuficiente (Chang, 2002). A emissão dos GEEs é sempre maior que a compensação durante o período de crescimento das espécies, pois as emissões são crescentes a cada ano, após o ano base utilizado para cálculo da compensação implantada, sendo necessário novos plantios sucessivos a cada ano (Flizikowski et al., 2013). Ou seja, apenas o plantio de árvores não resolve a problemática, mas sim a conjunção de técnicas e práticas “verdes”, em diversos setores da cadeia de extração e refino, potencializando as compensações.

Hoje, os aspectos ambientais são introduzidos na elaboração de políticas públicas, e o desenvolvimento só é considerado perfeito, se este for sustentável. De acordo com Chang (2002), a abordagem de precaução ambiental deve ser adotada como ponto de partida, implicando na mudança do modelo de desenvolvimento econômico, no qual uma política ambiental preventiva demanda a proteção e uso cuidadoso dos recursos naturais.

A demanda por desenvolvimento socioeconômico não é tarefa fácil em uma sociedade a qual grande parte da população requer condições mínimas de sobrevivência. Ações de preservação ambiental necessitam que seja repensado todo o modelo de desenvolvimento a ser adotado e a distribuição desigual de renda (Almeida Neto, 2017; Abreu et al., 2021). Sendo assim, a indústria do petróleo não pode ser vista de forma dissociada do meio ambiente, já que a proteção da biodiversidade é fator essencial para a garantia da saúde do homem e o desempenho do ser humano no cumprimento de suas tarefas. Dessa forma, as estratégias para redução e compensação dos impactos gerados deve ser pensada em conjunto, criando uma gestão sustentável de extração e produção, por meio da sustentabilidade ambiental incorporada aos projetos.

Como exemplo da possibilidade de uma gestão verdadeiramente sustentável através da combinação da restauração florestal e inclusão social, pode-se citar o Programa Replantando Vida – PRV, realizado pela Companhia Estadual de Águas e Esgoto do Rio de Janeiro (CEDAE), utilizando a mão de obra de presidiários e reciclando o resíduo gerado nas estações de tratamento de esgoto, o biossólido. Abreu et al. (2021), explicam que o programa emprega, treina e remunera internos do sistema carcerário para trabalhar em atividades de emergência, incluindo coleta de sementes, produção de mudas de árvores florestais, plantio e gestão de recursos hídricos, além de distribuir gratuitamente mudas produzidas por presidiários nos viveiros da Companhia Estadual de Águas e Esgoto do Rio de Janeiro (CEDAE).

Nesse sentido, em estudos sobre “Aproveitamento do cascalho de perfuração de poços para elaboração de pasta de cimentação primária”, Almeida Neto (2017), além de demonstrar a utilização técnica do resíduo como matéria-prima da pasta, propõe uma oportunidade à sociedade de geração de emprego e renda por meio da implementação de projeto social. O

objetivo do projeto consiste no beneficiamento do cascalho a ser empregado como matéria prima da pasta, visto que o beneficiamento ainda não é realizado pela indústria. Por meio do estudo, o autor demonstra a viabilidade técnica e econômica do projeto, permitindo que tanto a sociedade civil, mas principalmente, quanto as grandes indústrias podem implantá-lo possibilitando o desenvolvimento sustentável.

A proposta de projeto descrita por Almeida Neto (2017), é replicável para a utilização do cascalho na produção de mudas, assim como para a maioria dos usos propostos na literatura (Meneses e Paula, 2015; Almeida et al., 2017; Almeida Neto, 2017; Silva et al., 2020; Ribeiro et al., 2022), já que para obtenção de todos esses produtos o beneficiamento do resíduo, com suas respectivas adaptações, é imprescindível, tornando a população agente integrante do processo e integrando o pilar social-econômico na cadeia de reciclagem dos cascalhos, para completude da sustentabilidade.

5. CONCLUSÕES

Considerando a produção de mudas florestais em tubetes, os cascalhos de perfuração *onshore* e *offshore* pós-sal, proporcionaram características químicas e físicas desejáveis nos substratos, sendo observados valores ideais de pH e CE para cultivo, melhorando a densidade, porosidade total e capacidade de retenção de água a 10 cm de tensão das formulações.

Para o cascalho *offshore* pré-sal foram verificadas características químicas inadequadas para seu uso como componente de substrato, principalmente devido aos elevados valores de pH e condutividade elétrica na dose 10%, e teores mais elevados dos metais Al, Cu, Mn, Zn e Pb.

Na produção das mudas de *Enterolobium contortisiliquum* e *Tabebuia roseoalba*, em comparação ao substrato comercial testado, de forma geral, a utilização dos cascalhos *onshore* (todas as doses), *offshore* pós-sal (todas as doses) e *offshore* pré-sal (dose 2,5%), resultaram em crescimento igual ou maior e qualidade superior para as mudas de ambas as espécies.

Considerando os dados de crescimento e qualidade, o emprego do cascalho na formulação de substratos para a produção das espécies nativas *Enterolobium contortisiliquum* e *Tabebuia roseoalba*, os cascalhos *onshore* e *offshore* pós-sal é recomendado para a produção de mudas em larga escala até a maior dose testada de 10%. Diferindo deste padrão o cascalho *offshore* pré-sal, pode ser empregado até a dose máxima de 2,5%.

A utilização dos cascalhos na composição de substratos é viável, e surge como alternativa sustentável para destinação dos mesmos, tanto para mitigação dos impactos causados com o descarte menos “limpo” dos resíduos, quanto para compensação através da produção de mudas arbóreas nativas para projetos de restauração florestal, podendo chegar 45 mil toneladas de cascalho reciclado na produção em larga escala.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, A. H. M. et al. Replanting life: Ecological and human restoration. *Restor. Ecol.* 30, e13493, 2022. <https://doi.org/10.1111/rec.13493>
- ABREU, A. H. M. et al. Produção de mudas e crescimento inicial em campo de *Enterolobium contortisiliquum* produzidas em diferentes recipientes. *Floresta*, v. 45, n. 1, p. 141-150, 2014.
- ABREU, A. H. M. D., ALONSO, J. M., MELO, L. A. D., LELES, P. S. D. S., & SANTOS, G. R. D. Caracterização de bio sólido e potencial de uso na produção de mudas de *Schinus terebinthifolia* Raddi. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, v. 24, p. 591-599, 2019.
- ALMEIDA NETO, J. B. de. Aproveitamento do cascalho de perfuração de poços para elaboração de pasta de cimentação primária. 2017.
- ALONSO, J. M. et al. Caracterização de bio sólidos para a produção de mudas de espécies arbóreas da mata atlântica. 2018. 126p. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais e Florestais)

– Departamento de Silvicultura e Manejo Florestal, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, Berlin, v. 22, p. 711-728, 2013.

ANP. AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS, 2016. Brazilian Statistical Yearbook of Petroleum, Natural Gas and Biofuels (“Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis”). Rio de Janeiro, RJ.

AWASTHI, A. K. et al. Zero waste approach towards a sustainable waste management. *Resources, Environment and Sustainability*, v. 3, p. 100014, 2021.

CALDEIRA, M. V. W. et al. Composto orgânico na produção de mudas de aroeira-vermelha. *Scientia Agraria*, Piracicaba, v. 9, n. 1, p. 27-33, 2008.

CHANG, M. Y. Sequestro de Carbono Florestal: oportunidades e riscos para o Brasil. *Revista Paranaense de Desenvolvimento*, Curitiba, n. 102, p. 85-101, 2002.

CNM. CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS MUNICÍPIOS (2023). Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. <https://ods.cnm.org.br/agenda-2030#oQueEAagenda>.

CRUZ, D. C. M. V. P. da et al. Ecotoxicidade de cascalhos de perfuração de poços de petróleo: aspectos ecológicos para a disposição em solo. 2022. 87p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Ecossistemas Agrícolas e Naturais, Universidade Federal de Santa Maria.

DE ALMEIDA, P. C.; ARAÚJO, O. de Q. F.; DE MEDEIROS, J. L. Managing offshore drill cuttings waste for improved sustainability. *Journal of cleaner production*, v. 165, p. 143-156, 2017.

DICKSON, A.; LEAF, A.; HOSNER, J. F. Quality appraisal of white spruce and white pine seedling stock in nurseries. *Forestry chronicle*, Ottawa, v.36, p. 10-13, 1960.

FERRAZ, M. V.; CENTURION, J. F.; BEUTLER, A. N. Caracterização física e química de alguns substratos comerciais. *Acta Scientiarum Agronomy*, Maringá, v.27, n.2, p.209-214, 2005.

FITO, J.; VAN HULLE, Stijn W. H. Wastewater reclamation and reuse potentials in agriculture: towards environmental sustainability. *Environment, Development and Sustainability*, v. 23, p. 2949-2972, 2021.

FLIZIKOWSKI, L. C. et al. PROPOSTA DE MODELO DE COMPENSAÇÃO DE EMISSÕES DE GEEs UTILIZANDO PLANTIOS FLORESTAIS. *ENCICLOPEDIA BIOSFERA*, v. 9, n. 17, 2013.

FORREST, N., STEIN, Z., & WIEK, A. Water-independent residential properties as a transformational solution to achieve water sustainability in desert cities? *Journal of Cleaner Production*, 214, 1038–1049, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.309>.

GONÇALVES, J. L. M.; SANTARELLI, E. D.; NETO, S. P. M.; MANARA, M. P. Produção de mudas de espécies nativas: substrato, nutrição, sombreamento e fertilização. In: GONÇALVES, J. L. M.; BENEDETTI, V. (Ed.). *Nutrição e fertilização florestal*. Piracicaba: IPEF, 2000. p.309-350.

GAUDARDE, G. Fertilizantes e química lideram agenda do gás no novo governo. Agência EPBR, 2 de fev. de 2023. Disponível em: <https://epbr.com.br/fertilizantes-e-quimica-lideram-agenda-do-gas-no-novo-governo-lula/>. Acesso em: 03 de fev. de 2023.

HIGASHIKAWA, F. S.; SILVA, C. A.; NUNES, C. A.; BETTIOL, W.; GUERREIRO, M. C. Physico-chemical evaluation of organic wastes compost-based substrates for eucalyptus seedlings growth. *Communications in soil science and plant analysis*. Londres, v.47, n.5, p.581-592, 2016.

INEA, 2022. Acordo Estadual de Restauração. Disponível em: <<http://www.inea.rj.gov.br/seas-e-bndes-celebram-acordo-em-prol-da-restauracao-da-mata-atlantica-do-rj/>>.

INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO E GÁS. Avaliação de opções para a destinação do cascalho gerado na perfuração de poços marítimos no Brasil. Rio de Janeiro, 2021.

INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE (IEMA). As emissões brasileiras de gases de efeito estufa nos setores de Energia e Processos Industriais em 2019. São Paulo, dez. de 2020. Disponível em: <https://energiaambiente.org.br/as-emissoes-brasileiras-de-gases-de-efeito-estufa-nos-setores-de-energia-e-de-processos-industriais-em-2019-20201201>. Acesso em: 03 de jan. de 2023.

KRATZ, D.; WENDLING, I. Crescimento de mudas de *Eucalyptus camaldulensis* em substratos à base de casca de arroz carbonizada. Rev. Ceres, Viçosa, v. 3, p. 348 – 354, 2016.

KRATZ, D., WENDLING, I., NOGUEIRA, A. C., & SOUZA, P. V. D. Propriedades físicas e químicas de substratos renováveis. Revista Árvore, v. 37, p. 1103-1113, 2013.

LEITE, T. D. S., DOMBROSKI, J. L. D., FREITAS, R. M. O. D., LEITE, M. D. S., & RODRIGUES, M. R. D. O. Produção de mudas de *Enterolobium contortisiliquum* e partição de assimilados em resposta à adubação fosfatada e inoculação com fungos micorrízicos. Ciência Florestal, v. 27, p. 1157-1166, 2017.

MAPA. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Instrução Normativa nº 14, de 15 de dezembro de 2004. Aprova as Definições e Normas sobre as Especificações e as Garantias, as Tolerâncias, o Registro, a Embalagem e a Rotulagem dos Substratos para Plantas, constantes do anexo desta instrução normativa. Disponível em: <<http://extranet.agricultura.gov.br/sislegis-consulta/consultarLegislacao.do?operacao=visualizar&id=10433>>.

MAPA. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Instrução Normativa SDA Nº 17. Diário Oficial da União- Seção 1, nº 99, 24 de maio de 2007. Métodos Analíticos Oficiais para Análise de Substratos para Plantas e Condicionadores de Solo. Brasília, 2007. Disponível em: <<http://extranet.agricultura.gov.br/sislegis-consulta/consultarLegislacao.do?operacao=visualizar&id=17762>>.

MAPA. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Instrução Normativa nº 31, de 23 de outubro de 2008. Altera os subitens 3.1.2, 4.1 e 4.1.2, do Anexo à Instrução Normativa SDA nº 17, de 21 de maio de 2007. Disponível em: <<http://extranet.agricultura.gov.br/sislegis-consulta/consultarLegislacao.do?operacao=visualizar&id=19154>>.

MEDEIROS, L. C. de. Adição de cascalho de perfuração da Bacia Potiguar em argilas para uso em materiais cerâmicos: influência da concentração e temperatura de queima. Dissertação (Mestrado em graduação em Ciências e Engenharia da Materiais) pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte - Programa de Pós-graduação em Ciências e Engenharia de Materiais, 2010.

MELO, F. P.; PINTO, S. R.; BRANCALION, P. H.; CASTRO, P. S.; RODRIGUES, R. R.; ARONSON, J.; & TABARELLI, M. Priority setting for scaling-up tropical forest restoration projects: Early lessons from the Atlantic Forest Restoration Pact. Environmental science & policy, v. 33, p. 395-404, 2013.

MELO, L. A. de et al. Qualidade e crescimento inicial de mudas de *Mimosa caesalpinifolia* Benth. Produzidas em diferentes volumes de recipientes. Ciência Florestal, Santa Maria v. 28, n. 1, p. 47-55, jan. – mar., 2018. DOI: 10.5902/1980509831574. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1980509831574>.

MENESES, C. G.; PAULA, G. de A. Avaliação do resíduo de cascalho de perfuração de poços de petróleo da bacia potiguar e alternativas para sua destinação e reaproveitamento. RUnPetro- ISSN 2316-6681, v. 3, n. 1, p. 29-38, 2014.

MORAES, L. F. D. de; ASSUMPÇÃO, J. M., PEREIRA, T. S., & LUCHIARI, C. Manual técnico para a restauração de áreas degradadas no Estado do Rio de Janeiro. 2013.

ONU. ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. 2015. Disponível em: <https://www.undp.org/content/dam/brazil/docs/agenda2030/undp-br-Agenda2030-completo-pt-br-2016.pdf>.

PERUSSI, G., DE FREITAS NETO, J. J., SANTOS, I. P., DA SILVA, J. M. S., & PIÑA-RODRIGUES, F. C. M. Potencial produtivo de sementes florestais nativas para a restauração florestal da Bacia do Rio Doce. *Conjecturas*, v. 22, n. 16, p. 376-390, 2022.

PETROBRAS. OTC 2022: reduzimos a intensidade das emissões de co2 por barril produzido em cerca de 50% entre 2009 e 2021. Fatos e Dados, 2022. Disponível em: < https://petrobras.com.br/en_us/fatos-e-dados/otc-2022-reduzimos-a-intensidade-das-emissoes-de-co2-por-barril-produzido-em-cerca-de-50-entre-2009-e-2021.htm>.

PNUD. PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO (2023). Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. <https://www.br.undp.org/content/brazil/pt/home/sustainable-development-goals.html>.

PNUMA. PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE. Resolução adotada na Assembleia Geral das Nações Unidas em 1 de março de 2019. Década de Restauração de Ecossistemas da ONU. Disponível em: <https://undocs.org/A/RES/73/284>.

REGAN, R. P. Evaluating alternative growing media components. In: WILKINSON, K. M.; HAASE, D. L.; PINTO, J. R. (coord.). *National Proceedings: Forest and Conservation Nursery Associations*, 2013. Fort Collins (CO): USDA Forest Service; Rocky Mountain Research Station. 2014. *Proceedings RMRS-P-72*. P. 50-53.

SCHÄFER, G. Produção de porta-enxertos cítricos em recipientes e ambiente protegido no Rio Grande do Sul. 2004. 129f. 2004. Tese de Doutorado. Tese (Doutorado em Fitotecnia)-Programa de Pós-graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.

SCHÄFER, G.; SOUZA, P. V. D.; FIOR, C. S. Um panorama das propriedades físicas e químicas de substratos utilizados em horticultura no sul do Brasil. *Ornamental Horticultura*, Campinas, v. 21, n. 3, p. 299 – 306, 2015.

MOREIRA DA SILVA, A. P.; SCHWEIZER, D.; RODRIGUES MARQUES, H.; CORDEIRO TEIXEIRA, A. M.; NASCENTE DOS SANTOS, T. V.; SAMBUICHI, R. H.; BADARI, C. G.; GAUDARE, T. & BRANCALION, P. H. Can current native tree seedling production and infrastructure meet an increasing forest restoration demand in Brazil?. *Restoration Ecology*, v. 25, n. 4, p. 509-515, 2017.

SILVA, A. C. R., CAMARA, R., PEREIRA, M. G., RIBEIRO, J. C., OLIVEIRA FILHO, J. Q., ZONTA, E. PRODUCTION OF SEEDLINGS OF *COLUBRINA GLANDULOSA* PERKINS WITH DRILLING WASTE FROM OIL WELLS AND MYCORRHIZAL INOCULATION. *FLORESTA*, v. 51, n. 3, p. 731-740, 2020.

SILVA, K. S., ARRUDA, A. G. R., da SILVA COSTA, D., TABOSA, L. D. G., de OLIVEIRA, Â. K. D., & de OLIVEIRA, F. K. D. SUBSTRATO ALTERNATIVO A BASE DE REJEITO DE COBRE E MATERIA ORGÂNICA NA PRODUÇÃO DE MUDAS DE IPÊ-BRANCO. *Educação, Ciência e Saúde*, v. 8, n. 1, 2021.

SILVA, R. F. D., DA ROS, C. O., ANTONIOLLI, Z. I., GROLI, A. L., SCHEID, D. L., BERTOLLO, G. M., & MISSIO, E. L. Crescimento e tolerância de mudas de *Enterolobium contortisiliquum* Vell. cultivadas em solo contaminado com zinco. *Ciência Florestal*, v. 28, p. 979-986, 2018.

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A. Análise de solo, plantas e outros materiais. 2. Ed. Porto Alegre: Departamento de Solos, UFRGS, p. 177-188. 1995.

USEPA. (1996). Digestão ácida de sedimentos, lamas e solos – método EPA 3050B. Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos. Recuperado em 27 de outubro de 2021, de <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-06/documents/epa-3050b.pdf>

VIEIRA, C. R., DE ASSIS CARNEIRO, R. S., BOTELHO, R. A., & DA COSTA, P. P. Doses de esterco bovino e equino no crescimento inicial de mudas de ipê-branco. *Revista Ecologia e Nutrição Florestal-ENFLO*, v. 10, p. e03-e03, 2022.

WENDLING, I., GUASTALA, D., & DEDECEK, R. Características físicas e químicas de substratos para produção de mudas de *Ilex paraguariensis* St. Hil. *Revista Árvore*, v. 31, p. 209-220, 2007.

WWF-BRASIL. Impactos ambientais do petróleo pressionam o setor para a energia limpa. WWF, 2022. Disponível em: < <https://www.wwf.org.br/?84444/impactos-ambientais-do-petroleo-pressionam-o-setor-para-a-energia-limpa>>.

ZAPATA, N.; GUERRERO, F.; POLO, A. Evaluación de corteza de pino y residuos urbanos como componentes de substratos de cultivo. *Agricultura Técnica*, v.65, n.4, p.378-387, 2005.

II. CONCLUSÕES GERAIS

A utilização de resíduos orgânicos da poda urbana e restos de alimentos compostados, e industriais petrolíferos, sendo os cascalhos de perfuração de poços de petróleo, como insumo na composição de substratos para produção de espécies arbóreas, se mostrou eficiente na transformação dos resíduos em coprodutos de uso agrícola e florestal.

A reciclagem dos resíduos nas formulações de substratos pode trazer significativos benefícios, tanto para qualidade das mudas produzidas como para a sustentabilidade ambiental. A combinação dos diferentes materiais resultou em melhoria nas características físicas e químicas dos substratos, incluindo aumento da retenção de água e da disponibilidade de nutrientes. Além disso, a utilização desses resíduos pode ser vista como uma alternativa sustentável para sua destinação, evitando impactos negativos ao meio ambiente. Portanto, pode-se concluir que a produção de mudas arbóreas com substratos compostos por resíduos orgânicos urbanos e resíduos industriais petrolíferos é uma técnica promissora para a restauração florestal e conservação da biodiversidade.

III. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo teve como proposta o reaproveitamento dos resíduos da poda arbórea urbana, restos de alimentos e cascalhos de perfuração de poços de petróleo, como substrato para utilização na produção de mudas florestais nativas em tubetes de 280 cm³.

Os testes realizados com os compostos orgânicos provenientes da compostagem dos resíduos sólidos urbanos orgânicos, apresentaram resultados satisfatórios utilizando a espécie *Tabebuia aurea*. Tendo em vista que a autoecologia de cada espécie florestal é distinta e demanda diferentes formulações de substratos e volumes de recipientes, é imprescindível realizar estudos com a mesma espécie em recipientes com capacidade volumétrica superior aos tubetes de 280 cm³ e compostos orgânicos, além de estudos com outras espécies para uma avaliação mais efetiva dos substratos propostos.

Os experimentos com os cascalhos de perfuração de poços de petróleo, demonstraram o potencial de utilização dos resíduos na formulação de substratos, melhorando parâmetros físicos e químicos do insumo para produção de espécies florestais de dois grupos sucessionais diferentes – pioneira (*Enterolobium contortisiliquum*) e não pioneira (*Tabebuia roseoalba*). No entanto, devido à heterogeneidade dos resíduos, é de extrema importância realizar uma caracterização química para analisar os teores de sódio, potássio e metais presentes nos resíduos antes de sua aplicação. Para viabilização do resíduo como insumo e a produção de diferentes espécies com os cascalhos, é necessário desenvolver técnicas de tratamento para reduzir os teores de elementos potencialmente tóxicos, para cascalhos como o cascalho *offshore* pré-sal, observado nesse estudo. Dessa forma, o uso dos resíduos da perfuração dos poços petrolíferos pode ser uma solução sustentável e viável para a produção de espécies florestais, diminuindo o volume dos resíduos dispostos em aterros e colaborando com a cadeia de restauração florestal.

Nos últimos anos, tem havido um crescente interesse nos estudos sobre formulações de substratos, que exigem tempo e investimentos financeiros para teste com todos os tipos de resíduos gerados provenientes das atividades humanas que incluam a sociedade e gerem empregos e renda. No entanto, nesse estudo a pandemia limitou a implantação de ações que contemplem a inserção de mão de obra da sociedade, embora a questão dos resíduos sólidos ainda represente um grande desafio. É essencial, portanto, que sejam realizados mais estudos que visem à coesão das esferas ambiental, social e econômica para um gerenciamento coordenado, saudável e sustentável dos resíduos. É crucial que a comunidade, as instituições de ensino, os órgãos de pesquisa e as grandes indústrias trabalhem juntos com o poder público para incentivar boas práticas de sustentabilidade, conservação e recuperação dos recursos naturais.

IV. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, A. H. M. D., ALONSO, J. M., MELO, L. A. D., LELES, P. S. D. S., & SANTOS, G. R. D. Caracterização de biossólido e potencial de uso na produção de mudas de *Schinus terebinthifolia* Raddi. Engenharia Sanitaria e Ambiental, v. 24, p.591-599, 2019.
- ASSOCIAÇÃO DE MUNICÍPIOS COVA DA BEIRA (AMCB). Central de Compostagem, 2006. [Online]. Disponível em < <http://www.amcb.pt/> >.
- ARAÚJO, C. S. D., LUNZ, A. M. P., SANTOS, V. B. D., ANDRADE NETO, R. D. C., NOGUEIRA, S. R., & SANTOS, R. S. D. Use of agro-industry residues as substrate for the production of Euterpe precatoria seedlings. Pesquisa Agropecuária Tropical, v.50, 2020.
- BANDEIRA, R. A. F., ARAÚJO, A. S., JUNIOR, A. M. S., & JUNIOR, F. O. F. Viabilidade técnica da aplicação do cascalho de perfuração de petróleo na fabricação de concreto betuminoso usinado a quente. Caderno de Pesquisa, Ciência e Inovação, p. 43. v.2, n.1, 2019.
- BRASIL. (2008) Plano Nacional sobre Mudança do Clima. Brasil: Ministério do Meio Ambiente. 172 p. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/clima/politica-nacional-sobre->

mudanca-do-clima/planonacional-sobre-mudanca-do-clima>. (2010) Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, seção 1. 3 p.

_____. (2010) Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, seção 1. 3 p.

CRUZ, D. C. M. V. P. D. Ecotoxicidade de cascalhos de perfuração de poços de petróleo: aspectos ecológicos para a disposição em solo. (2022) Dissertação (mestrado), Universidade Federal de Santa Catarina, Curitibanos, 87 p.

CUNHA, F. L., SILVA, O. M. D. C., ARAÚJO, V. C. D., VENTURIN, N., & MELO, L. A. D. Palha de café carbonizada em substratos renováveis para produção de mudas de *Eucalyptus urophylla* e *Anadenanthera macrocarpa*. *Ciência Florestal*, v. 32, p. 548-572, 2022.

DE ALMEIDA, P. C., ARAÚJO, O. D. Q. F., & DE MEDEIROS, J. L. Managing offshore drill cuttings waste for improved sustainability. *Journal of cleaner production*, v. 165, p. 143-156, 2017.

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA E AGROPECUÁRIA. LANA, M. M. e PROENÇA, L. C. Resíduos orgânicos. Hortaliça não é só salada. Ago. 2021. Disponível em: <
[EPA. Profile of the Oil and Gas Extraction Industry. In: Sector Notebook Project, EPA/310-R-99-006, October. 2000.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Balanço Energético Nacional 2019: Ano base 2018. Rio de Janeiro: Ministério de Minas e Energia, 2019.

IEA. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. KEY WORLD ENERGY STATISTICS, 2016. OECD/IEA: 2016. Available at: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2016.pdf>.

IOGP-Associação Internacional de Produtores de Petróleo e Gás. \(2016\). Revisão da Tecnologia de Gerenciamento de Resíduos de Perfuração. Relatório 557. IOGP Londres, Reino Unido.

KAZAMIAS, G., & ZORPAS, A. A. Drill cuttings waste management from oil & gas exploitation industries through end-of-waste criteria in the framework of circular economy strategy. *Journal of cleaner production*, v. 322, p. 129098, 2021.

MELO, F. P.; PINTO, S. R.; BRANCALION, P. H.; CASTRO, P. S.; RODRIGUES, R. R.; ARONSON, J.; & TABARELLI, M. Priority setting for scaling-up tropical forest restoration projects: Early lessons from the Atlantic Forest Restoration Pact. *Environmental science & policy*, v. 33, p. 395-404, 2013.

MENDES, André Pompeo do Amaral et al. Panoramas setoriais 2030: petróleo e gás. In: Panoramas setoriais 2030: desafios e oportunidades para o Brasil. Rio de Janeiro: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2017. Sem volume, p.\[93\] -105.

NJUGUNA, JAMES et al. The fate of waste drilling fluids from oil & gas industry activities in the exploration and production operations. *Waste Management*, v. 139, p. 362-380, 2022.

PACTO GLOBAL \(2023\). AZUMA, J. C. O Pacto Global das Nações Unidas: uma via para a responsabilidade das empresas pela concretização dos direitos humanos. 20 p., 2023.

PERUSSI, G., DE FREITAS NETO, J. J., SANTOS, I. P., DA SILVA, J. M. S., & PIÑA-RODRIGUES, F. C. M. Potencial produtivo de sementes florestais nativas para a restauração florestal da Bacia do Rio Doce. *Conjecturas*, v. 22, n. 16, p. 376-390, 2022.

PIRES, I. C. G.; FERRÃO, G. DA E. Compostagem no Brasil sob a perspectiva da legislação ambiental. *Revista Trópica: Ciências Agrárias e Biológicas*, v. 9, n. 01, p. 1–18, 2017.](https://www.embrapa.br/hortalica-nao-e-so-salada/secoes/residuos-organicos#:~:text=No%20Brasil%2C%20os%20res%C3%ADduos%20org%C3%A2nicos,e%20os%20rejeitos%20(22%20%25).>)

PNUMA. PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE. Resolução adotada na Assembleia Geral das Nações Unidas em 1 de março de 2019. Década de Restauração de Ecossistemas da ONU. Disponível em: <https://undocs.org/A/RES/73/284>.

RIBEIRO, J. C., PORTZ, A., DOS SANTOS, F. S., PEREIRA, M. G., & ZONTA, E. Oil well drill cuttings and sunflower cake: effects on sunflower crop and soil Chemical attributes. *Environmental Technology*, p. 1-12, 2022.

SILVA, K. S., ARRUDA, A. G. R., da SILVA COSTA, D., TABOSA, L. D. G., de OLIVEIRA, Â. K. D., & de OLIVEIRA, F. K. D. SUBSTRATO ALTERNATIVO A BASE DE REJEITO DE COBRE E MATERIA ORGÂNICA NA PRODUÇÃO DE MUDAS DE IPÊ-BRANCO. *Educação, Ciência e Saúde*, v. 8, n. 1, 2021.

SILVA, A. C. R., CAMARA, R., PEREIRA, M. G., RIBEIRO, J. C., OLIVEIRA FILHO, J. Q., ZONTA, E. Production of seedlings of *Colubrina glandulosa* perkins with drilling waste from oil wells and mycorrhizal inoculation. *FLORESTA*, v. 51, n. 3, p. 731-740, 2020.

SILVA, K. S., ARRUDA, A. G. R., da SILVA COSTA, D., TABOSA, L. D. G., de OLIVEIRA, Â. K. D., & de OLIVEIRA, F. K. D. Substrato alternativo a base de rejeito de cobre e materia orgânica na produção de Mudanças de ipê-branco. *Educação, Ciência e Saúde*, v. 8, n. 1, 2021.

ZAGO, V. C. P., & BARROS, R. T. D. V. Gestão dos resíduos sólidos orgânicos urbanos no Brasil: do ordenamento jurídico à realidade. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 24, p. 219-228, 2019.

ZORPAS, A.A. Strategy development in the framework of waste management. *Sci. Total Environ.* 716, 137088, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137088>.