



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS - CCA
BACHARELADO EM AGROECOLOGIA



LUCAS PANISA TANGERINA

**ESTABELECIMENTO DE ESPÉCIES ARBÓREAS
NATIVAS POR SEMEADURA DIRETA EM ÁREA DE RESTAURAÇÃO
FLORESTAL NA MATA ATLÂNTICA**

Araras - SP

2026

LUCAS PANISA TANGERINA

**ESTABELECIMENTO DE ESPÉCIES ARBÓREAS
NATIVAS POR SEMEADURA DIRETA EM ÁREA DE RESTAURAÇÃO FLORESTAL
NA MATA ATLÂNTICA**

**ESTABLISHMENT OF NATIVE TREE SPECIES BY DIRECT SEEDING IN A
ATLANTIC FOREST RESTORATION AREA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Agroecologia da
Universidade Federal de São Carlos - UFSCar,
como requisito parcial para obtenção do título de
Bacharel em Agroecologia.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Augusto Gorne Viani

Araras - SP

2026

AGRADECIMENTO

Registro, inicialmente, minha gratidão a Deus e a Jesus Cristo, pela condução de minha caminhada, pela força concedida nos momentos de dificuldade e pela oportunidade de concluir mais esta etapa da minha formação. A fé foi sustento constante ao longo desse percurso e teve papel essencial para que eu mantivesse a serenidade, a perseverança e a confiança necessárias durante toda a graduação.

À minha família, expresso meu mais profundo agradecimento pelo apoio incondicional e pelo incentivo que sempre acompanhou minha trajetória. De maneira especial, agradeço a Douglas Donizete Tangerina, Elen Fabiana Panisa Tangerina, a minha querida avó Maria Angélica e minha saudosa Tia Cristiane que estiveram presentes com cuidado, confiança e apoio em todos os momentos, sendo fundamentais para que eu pudesse seguir em frente e alcançar este objetivo.

Agradeço também às minhas colegas de graduação, cuja convivência, amizade e incentivo tornaram essa caminhada mais leve e mais significativa. O apoio compartilhado ao longo dos anos, nas dificuldades e nas conquistas, foi parte importante da construção desta trajetória.

Ao Laboratório de Silvicultura e Pesquisas Florestais (LASPEF), manifesto meu reconhecimento pela oportunidade de aprendizado, pela convivência acadêmica e pela contribuição direta para minha formação. O contato com o grupo representou não apenas um espaço de desenvolvimento técnico e científico, mas também de amadurecimento pessoal e profissional.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Ricardo Augusto Gorne Viani, agradeço pela orientação segura, pela confiança depositada em meu trabalho, pela seriedade na condução deste estudo e por todos os ensinamentos transmitidos ao longo do processo. Sua contribuição foi decisiva para o desenvolvimento deste TCC e para meu crescimento acadêmico.

À minha república, Galo Bravo, deixo meu agradecimento pela convivência, pela parceria e pelos momentos compartilhados ao longo dessa etapa da vida universitária. As experiências vividas nesse ambiente certamente também fazem parte da história que este trabalho representa.

Por fim, agradeço a todos aqueles que, de diferentes formas, contribuíram para minha formação e para a realização deste trabalho. Cada apoio recebido, seja acadêmico, pessoal ou afetivo, teve sua importância na conclusão deste ciclo.

RESUMO

A restauração florestal por semeadura direta tem sido considerada uma estratégia para ampliar a escala da restauração ecológica, porém seu sucesso depende do estabelecimento, crescimento e permanência das espécies em campo. Este trabalho teve como objetivo avaliar o estabelecimento, o crescimento e a contribuição estrutural e funcional de espécies arbóreas nativas em uma área de restauração florestal por semeadura direta localizada no Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de São Carlos, em Araras, SP, seis anos após a implantação. A área experimental possui 0,27 ha e foi originalmente implantada com 29 espécies arbóreas nativas, em delineamento composto por seis blocos e quatro tratamentos. Foram avaliados os indivíduos arbóreos estabelecidos, com registro de espécie, altura, diâmetro. A partir dos dados coletados, foram calculados indicadores de estabelecimento, densidade, crescimento, área basal, biomassa, carbono e custos associados à semeadura direta. Aos 72 meses após a implantação, foram registrados 5.219 indivíduos estabelecidos, distribuídos em 13 espécies. *Sapindus saponaria* apresentou maior número de indivíduos, maior densidade na área e maior percentual de estabelecimento, enquanto *Peltophorum dubium* apresentou maior crescimento estrutural, biomassa média por indivíduo e carbono total estimado por espécie. Para as estimativas de carbono, foram considerados 1.526 indivíduos com diâmetro do caule a 30 cm de altura superior a 3 cm, conforme critério adotado para inclusão nos cálculos. Em escala agregada, a área apresentou densidade estimada de 19.329,63 indivíduos ha⁻¹, estoque de carbono de 44,06 Mg C ha⁻¹, custo médio de R\$ 0,62 por indivíduo estabelecido e custo total de implantação de R\$ 12.060,54 ha⁻¹. Os resultados demonstram que a semeadura direta foi eficiente para formar uma comunidade arbórea estabelecida, porém com desempenho seletivo entre as espécies. Conclui-se que a avaliação da semeadura direta deve integrar indicadores de estabelecimento, crescimento, biomassa, carbono e custo, permitindo identificar espécies com diferentes formas de contribuição para a restauração florestal.

Palavras-chave: restauração ecológica; sementes nativas; estabelecimento de espécies; biomassa; carbono.

ABSTRACT

Direct seeding forest restoration has been considered an alternative to scale up ecological restoration, but its success depends on the establishment, growth, and persistence of species in the field. This study aimed to evaluate the establishment, growth, and structural and functional contribution of native tree species in a forest restoration area using direct seeding, located at the Center for Agricultural Sciences of the Federal University of São Carlos, in Araras, SP, six years after implementation. The experimental area consists of 0.27 ha and was originally planted with 29 native tree species, in a design composed of six blocks and four treatments. Established tree individuals were evaluated, with records of species, height, diameter, and experimental position. From the collected data, indicators of establishment, density, growth, basal area, biomass, carbon, and costs associated with direct seeding were calculated. At 72 months after implementation, 5,219 established individuals were recorded, distributed across 13 species. *Sapindus saponaria* showed the highest number of individuals, higher density, and greater linear occupation, while *Peltophorum dubium* showed greater structural growth, average biomass per individual, and total estimated carbon per species. For carbon estimates, 1,526 individuals with D30 greater than 3 cm were considered, according to the criterion adopted for inclusion in the calculations. On an aggregate scale, the area presented an estimated density of 19,329.63 individuals ha⁻¹, a carbon stock of 44.06 Mg C ha⁻¹, an average cost of R\$ 0.62 per established individual, and a total implementation cost of R\$ 12,060.54 ha⁻¹. The results demonstrate that direct seeding was efficient in forming an established tree community, albeit with selective performance among species. It is concluded that the evaluation of direct seeding must integrate indicators of establishment, growth, biomass, carbon, and cost, allowing the identification of species with different forms of contribution to forest restoration.

Keywords: ecological restoration; native seeds; species establishment; biomass; carbon.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
2. REVISÃO DE LITERATURA	10
2.1 RESTAURAÇÃO FLORESTAL NA MATA ATLÂNTICA	10
2.2.1 Potencial e limitações da semeadura direta.....	13
2.2.2 Estabelecimento e crescimento inicial de espécies arbóreas nativas	14
2.2.3 Fatores que influenciam o desempenho das espécies em campo	15
2.2.4 Arranjo de espécies e implicações para o desempenho em restauração	16
2.3.1 Densidade de indivíduos e crescimento inicial	17
2.3.2 Densidade da madeira, biomassa e carbono.....	18
3. OBJETIVOS.....	19
3.1 OBJETIVO GERAL	19
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	19
4.1 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL	21
4.2 COLETA DE DADOS.....	22
4.3 ESTIMATIVA DE BIOMASSA, CARBONO E DENSIDADE DA MADEIRA.....	24
4.4 PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE DADOS.....	25
4.5 INDICADORES ECONÔMICOS	27
5. RESULTADOS.....	27
5.1 ESTABELECIMENTO, DENSIDADE E CRESCIMENTO DAS ESPÉCIES	27
5.2 BIOMASSA, CARBONO E INDICADORES ECONÔMICOS POR ESPÉCIE	32
5.3 INDICADORES AGREGADOS DA ÁREA RESTAURADA	39
6. DISCUSSÃO.....	41
6.1 ESTABELECIMENTO E PERMANÊNCIA DAS ESPÉCIES APÓS SEIS ANOS	41
6.2 DIFERENÇAS ENTRE DENSIDADE, CRESCIMENTO E CONTRIBUIÇÃO FUNCIONAL	42
6.3 BIOMASSA, CARBONO E DESEMPENHO ECONÔMICO DA SEMEADURA DIRETA...	43
6.4 SÍNTESE DO DESEMPENHO DA ÁREA RESTAURADA	44

7. CONCLUSÃO	47
REFERÊNCIAS	48
APÊNDICE A – LISTA DAS ESPÉCIES ARBÓREAS NATIVAS UTILIZADAS NA IMPLANTAÇÃO DO EXPERIMENTO	52

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Levantamento aéreo da área experimental com drone DJI Mavic 3 Enterprise.....	20
Figura 2 – Área experimental de restauração por semeadura direta	21
Figura 3 – Medição altura e DAS	23
Figura 4 – Medição D30	23
Figura 5 – Tabelando dados	24
Figura 6 – Distribuição da altura dos indivíduos estabelecidos por espécie aos 72 meses após a semeadura direta	32
Figura 7 – Distribuição da biomassa total por indivíduo das espécies estabelecidas aos 72 meses após a semeadura direta	35
Figura 8 – Carbono total estimado por espécie aos 72 meses após a semeadura direta	36

1. INTRODUÇÃO

A restauração da vegetação nativa tornou-se uma estratégia central para enfrentar a perda de biodiversidade, a fragmentação de habitats e a redução de serviços ecossistêmicos em paisagens tropicais. No Brasil, essa demanda é especialmente relevante na Mata Atlântica, bioma historicamente submetido à conversão da vegetação nativa para usos agropecuários, urbanos e industriais, resultando em paisagens fragmentadas e com diferentes níveis de degradação (FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA; INPE, 2025; MAPBIOMAS, 2025). Nesse contexto, restaurar áreas degradadas não significa apenas recompor a cobertura arbórea, mas favorecer a retomada gradual da estrutura, da composição florística e de processos ecológicos capazes de sustentar a trajetória de recuperação ao longo do tempo.

Apesar dos avanços da restauração florestal no país, ainda existem desafios relacionados à qualidade ecológica das áreas restauradas, especialmente quanto à escolha das espécies e à representatividade florística dos projetos. Estudos recentes indicam que plantios de restauração na Mata Atlântica têm utilizado um conjunto relativamente restrito e homogêneo de espécies arbóreas, o que pode limitar a recuperação da diversidade vegetal e favorecer a simplificação das comunidades restauradas (ALMEIDA et al., 2024). Além disso, mesmo plantios com maior diversidade podem não representar adequadamente as floras locais da Mata Atlântica (ALMEIDA et al., 2025). Dessa forma, avaliar o desempenho de espécies nativas em campo é fundamental para compreender quais espécies e combinações apresentam maior contribuição para a consolidação de áreas em restauração.

Entre as técnicas de restauração ativa, a semeadura direta apresenta potencial para ampliar a escala da restauração, uma vez que permite a introdução de sementes diretamente no campo e reduz etapas associadas à produção, ao transporte e ao plantio de mudas (SOUZA; ENGEL, 2023). No entanto, sua eficiência depende de uma série de fatores ecológicos e operacionais, como a qualidade das sementes, condições ambientais da área, o controle da vegetação competidora, a predação e as características das espécies utilizadas (FERREIRA; VIEIRA, 2024). Assim, a técnica exige avaliação criteriosa, principalmente porque o número de indivíduos efetivamente estabelecidos resulta de processos sucessivos de germinação, emergência, sobrevivência e crescimento em campo.

O estabelecimento das espécies semeadas é um dos principais indicadores para avaliar a eficiência da semeadura direta em áreas de restauração florestal (FREITAS et al., 2019). Entretanto, a simples presença de indivíduos não é suficiente para interpretar a trajetória da área em restauração, pois espécies com diferentes padrões de crescimento, densidade e persistência podem contribuir de

maneiras distintas para a estruturação da comunidade. Por isso, variáveis como número de indivíduos, altura e diâmetro são importantes para comparar o desempenho das espécies e dos tratamentos, permitindo identificar respostas distintas entre os arranjos de espécies utilizados na implantação (OLIVEIRA et al., 2021; RIBEIRO; MASSI, 2025).

Além dos indicadores de estabelecimento e crescimento, estimativas de biomassa total e carbono permitem ampliar a interpretação sobre a contribuição funcional das espécies estabelecidas (GARDON et al., 2020). Esses atributos relacionam o desenvolvimento estrutural da vegetação à recuperação de serviços ecossistêmicos, especialmente aqueles associados ao acúmulo de matéria orgânica e à mitigação das mudanças climáticas (ZANINI et al., 2021). Dessa forma, integrar indicadores demográficos, morfométricos e funcionais contribui para uma avaliação mais completa da restauração, especialmente em áreas implantadas por semeadura direta e acompanhadas após os estágios iniciais de desenvolvimento (RIBEIRO; MASSI, 2025).

Nesse contexto, reavaliações de áreas já implantadas são importantes para verificar se os padrões observados nos primeiros anos da restauração se mantêm ou se modificam ao longo do tempo. Em experimentos com semeadura direta, essa abordagem é especialmente relevante, pois a emergência inicial das espécies não necessariamente representa seu desempenho posterior (SOUZA; ENGEL, 2023). Assim, o acompanhamento em fases mais avançadas permite identificar espécies com maior persistência, crescimento e contribuição estrutural, além de gerar informações úteis para o aprimoramento técnico da restauração por sementes nativas (RIBEIRO; MASSI, 2025).

Diante disso, este trabalho avalia o estabelecimento de espécies arbóreas nativas implantadas por semeadura direta em uma área de restauração florestal localizada no Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de São Carlos, em Araras, SP. A pesquisa considera uma área experimental composta por blocos e tratamentos com diferentes arranjos de espécies, reavaliada seis anos após a implantação, com análise do número de indivíduos estabelecidos, crescimento em altura e diâmetro, densidade, biomassa total e carbono estimado. Com isso, busca-se contribuir para o aprimoramento da semeadura direta como estratégia de restauração da Mata Atlântica, especialmente em áreas de Floresta Estacional Semidecidual.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 RESTAURAÇÃO FLORESTAL NA MATA ATLÂNTICA

A restauração florestal na Mata Atlântica precisa ser compreendida a partir do histórico de degradação que moldou a paisagem do bioma. A conversão da vegetação nativa para usos agropecuários, urbanos e industriais reduziu drasticamente a cobertura florestal e produziu uma configuração espacial marcada por fragmentos pequenos, isolados e fortemente influenciados por efeitos de borda (RIBEIRO et al., 2009). Esse processo não compromete apenas a permanência das espécies, mas também enfraquece a conectividade entre remanescentes, altera fluxos ecológicos e reduz a capacidade da paisagem de sustentar comunidades florestais mais complexas (VANCINE et al., 2024). Nesse contexto, a restauração deixa de ser uma ação acessória e passa a integrar o núcleo das estratégias de conservação da Mata Atlântica, uma vez que conservar os remanescentes existentes, embora indispensável, não é suficiente para responder à magnitude da transformação sofrida pelo bioma.

Esse entendimento foi sendo consolidado à medida que a restauração ecológica amadureceu no Brasil. Durante muito tempo, restaurar esteve fortemente associado à recomposição da cobertura arbórea, como se o simples recobrimento da área fosse suficiente para indicar recuperação ambiental. Com o avanço da pesquisa e da prática restaurativa, ficou evidente que o desafio é mais profundo. Restaurar uma floresta tropical diversa implica criar condições para que a área siga uma trajetória ecológica capaz de sustentar processos de regeneração, reorganização da comunidade e aumento gradual de complexidade. Na Mata Atlântica, essa mudança conceitual foi decisiva porque deslocou o foco do plantio em si para a construção de comunidades mais estáveis, diversas e autossustentáveis ao longo do tempo (RODRIGUES et al., 2009).

Ainda assim, a ampliação das iniciativas não elimina a necessidade de avaliação crítica da restauração. A recuperação da vegetação representa um avanço importante, mas não encerra a discussão sobre o sucesso restaurativo. Áreas revegetadas podem continuar distantes dos ecossistemas de referência em aspectos ligados à biodiversidade, à composição das espécies e ao funcionamento ecológico. Por isso, a avaliação da restauração não deve se restringir à presença de árvores em campo, mas considerar também a capacidade dessas áreas de recuperar atributos que se aproximem, ainda que gradualmente, daqueles observados em florestas conservadas (ROMANELLI et al., 2022).

Nos últimos anos, esse debate ganhou força com estudos que chamaram atenção para a composição florística dos plantios de restauração na Mata Atlântica. Mesmo com o crescimento da restauração em área, os plantios têm recorrido a um conjunto relativamente restrito e homogêneo de espécies arbóreas, pouco representativo da flora do bioma. Esse padrão sugere que o avanço

quantitativo da restauração nem sempre tem sido acompanhado por um avanço equivalente em diversidade e representatividade ecológica. Em um bioma reconhecido por sua alta diversidade e pela forte variação florística entre regiões, essa simplificação tem implicações importantes para a qualidade das áreas restauradas e para seu potencial de conservação em longo prazo (ALMEIDA et al., 2024).

É nesse cenário que estudos voltados às técnicas de implantação e ao desempenho das espécies se tornam especialmente relevantes. Se a restauração da Mata Atlântica não depende apenas de restaurar mais áreas, mas de restaurar com maior qualidade ecológica, então passa a ser necessário discutir de que forma diferentes estratégias favorecem o estabelecimento de espécies nativas e contribuem para a formação de comunidades mais coerentes com a vegetação regional (RODRIGUES et al., 2009; ALMEIDA et al., 2024). Assim, a análise da semeadura direta se insere em uma questão maior da restauração no bioma: compreender como a técnica empregada pode influenciar a trajetória inicial da área restaurada e condicionar a qualidade ecológica do processo restaurativo.

2.2 SEMEADURA DIRETA NA RESTAURAÇÃO FLORESTAL

Entre as diferentes técnicas utilizadas na restauração florestal, a semeadura direta ganhou destaque por alterar de forma importante a lógica de implantação. Em vez de concentrar o esforço na produção de mudas em viveiro para posterior plantio no campo, essa técnica transfere para a própria área restaurada as etapas iniciais do desenvolvimento vegetal (ENGEL; PARROTTA, 2001). Isso significa que germinação, emergência e estabelecimento passam a ocorrer sob as condições reais do ambiente, e não sob maior controle prévio. Em termos práticos, essa mudança amplia a dependência das condições locais, mas também abre a possibilidade de simplificar parte da implantação e reduzir custos em determinadas situações (SOUZA; ENGEL, 2023).

O interesse pela semeadura direta está ligado, em grande medida, ao desafio de tornar a restauração mais viável em larga escala (SOUZA; ENGEL, 2023). Em áreas extensas, ou em contextos nos quais o plantio convencional de mudas demanda grande investimento em viveiro, transporte, mão de obra e manutenção, a semeadura direta aparece como uma alternativa promissora (ENGEL; PARROTTA, 2001). Essa promessa, contudo, não deve ser confundida com simplicidade técnica. A literatura mostra que a técnica pode apresentar vantagens operacionais e econômicas, mas seus resultados variam consideravelmente em função das espécies utilizadas, da disponibilidade e

qualidade das sementes, do preparo da área e das condições ambientais encontradas após a implantação (FREITAS et al., 2019; SOUZA; ENGEL, 2023).

Assim, a semeadura direta não deve ser tratada como substituição automática do plantio de mudas, mas como uma estratégia cuja eficiência depende de adequação ecológica e planejamento metodológico (SOUZA; ENGEL, 2023). Seu valor para a restauração florestal está justamente na possibilidade de ampliar alternativas de implantação, sobretudo quando o objetivo é combinar viabilidade operacional e formação inicial de cobertura arbórea. Discutir a semeadura direta, portanto, implica analisar ao mesmo tempo seu potencial, suas limitações e os filtros que condicionam o desempenho das espécies em campo (FREITAS et al., 2019).

2.2.1 Potencial e limitações da semeadura direta

O potencial da semeadura direta está diretamente relacionado à necessidade contemporânea de restaurar áreas extensas sem tornar o processo inviável do ponto de vista econômico e operacional (SOUZA; ENGEL, 2023). A técnica pode reduzir etapas associadas à produção de mudas, ao transporte e ao plantio manual, o que a torna especialmente atraente em programas de maior escala (ENGEL; PARROTTA, 2001; MELI et al., 2018). Em contextos favoráveis, também pode contribuir para rápida ocupação inicial do solo e para a formação de cobertura vegetal, o que ajuda a explicar o crescente interesse que vem recebendo na literatura sobre restauração tropical (MELI et al., 2018).

Por outro lado, a mesma característica que torna a técnica atrativa também expõe suas principais fragilidades. Ao deslocar para o campo fases que, no plantio de mudas, ocorreriam sob maior proteção, a semeadura direta aumenta a vulnerabilidade das sementes e plântulas às variações ambientais e às perdas iniciais (SOUZA; ENGEL, 2023). Falhas de germinação, baixa emergência, mortalidade precoce e grande oscilação entre áreas são limitações recorrentes (FREITAS et al., 2019), o que faz com que a técnica dependa de um ajuste fino entre escolha de espécies, densidade de semeadura, qualidade das sementes e manejo da área (MELI et al., 2018; SOUZA; ENGEL, 2023). Isso significa que a redução de custos e de operações não elimina a necessidade de planejamento; ao contrário, torna esse planejamento ainda mais decisivo.

Outro limite importante está na previsibilidade dos resultados. No plantio de mudas, o número de indivíduos introduzidos na área é conhecido desde a implantação. Na semeadura direta, o número de indivíduos efetivamente estabelecidos só se define após uma sequência de eventos ecológicos que

inclui germinação, emergência e sobrevivência inicial (SOUZA; ENGEL, 2023). Essa diferença torna a técnica mais sensível a incertezas e reforça a importância de ajustes metodológicos, sobretudo quando se busca alcançar densidades compatíveis com os objetivos da restauração. Dessa forma, o potencial da semeadura direta não reside em uma suposta universalidade, mas em sua aplicação criteriosa em situações nas quais as condições ecológicas e operacionais favoreçam seu uso (MELI et al., 2018).

2.2.2 Estabelecimento e crescimento inicial de espécies arbóreas nativas

Na semeadura direta, o estabelecimento das espécies arbóreas nativas deixa de ser uma simples etapa do processo e passa a funcionar como um filtro ecológico central. O sucesso da técnica depende de que as sementes consigam germinar, emergir e originar plântulas capazes de sobreviver sob as condições do ambiente restaurado (ENGEL; PARROTTA, 2001). Por isso, o desempenho inicial observado em campo expressa, de maneira bastante direta, a interação entre características biológicas das espécies e condições ambientais da área (FREITAS et al., 2019). É justamente nessa fase que se define, em grande medida, quais espécies conseguirão contribuir para a formação da comunidade arbórea inicial e quais apresentarão desempenho insuficiente para se manter na área.

A literatura mostra de forma consistente que as espécies não respondem de maneira uniforme à semeadura direta (AGUIRRE; FERREIRA; KAGEYAMA, 2015). Mesmo quando submetidas ao mesmo método de implantação, algumas exibem maior capacidade de emergência e sobrevivência, enquanto outras apresentam desempenho muito mais restrito (FREITAS et al., 2019). Esse contraste indica que o sucesso da técnica não depende apenas da opção pela semeadura direta, mas da compatibilidade entre as espécies escolhidas e as exigências ecológicas do ambiente a ser restaurado. Em outras palavras, semear diretamente não garante, por si só, o estabelecimento das espécies; é necessário compreender quais espécies são mais promissoras para esse tipo de implantação.

Nos últimos anos, essa discussão passou a incorporar também o papel dos atributos funcionais das sementes. Estudos recentes mostram que traços ligados à germinação ajudam a explicar diferenças no sucesso de estabelecimento após a semeadura direta, o que amplia a interpretação do desempenho das espécies para além da dimensão operacional (LAUMANN et al., 2023). Essa abordagem é particularmente relevante porque permite compreender que a resposta das espécies em campo não decorre apenas do manejo, mas também de características biológicas que influenciam a forma como germinam, emergem e enfrentam as condições do ambiente restaurado (SOUZA; ENGEL, 2024).

2.2.3 Fatores que influenciam o desempenho das espécies em campo

O desempenho das espécies em campo é condicionado por um conjunto de fatores ambientais e operacionais que interagem de forma contínua. Na semeadura direta, essa interação é especialmente importante porque sementes e plântulas ficam expostas desde o início às condições do solo, ao regime hídrico, à competição com outras plantas e à ação de predadores (SOUZA et al., 2021). Os resultados observados na área, portanto, não refletem apenas a técnica escolhida, mas a maneira como essa técnica é aplicada em um ambiente concreto, com espécies concretas e sob determinado regime de manejo (FERREIRA; VIEIRA, 2024).

Entre esses fatores, a competição com gramíneas e outras herbáceas costuma ocupar posição de destaque. Em áreas anteriormente utilizadas como pastagem, essa vegetação competitiva pode reduzir de forma expressiva a disponibilidade de água, luz e nutrientes para as espécies arbóreas, além de dificultar a emergência das plântulas (SOUZA et al., 2021). Não por acaso, o controle da vegetação competitiva aparece de forma recorrente nas recomendações técnicas voltadas à restauração por semeadura direta, já que sua presença pode comprometer desde as primeiras fases do estabelecimento até o crescimento inicial dos indivíduos.

As condições do micro-sítio também influenciam fortemente o resultado da implantação. Pequenas variações na cobertura do solo, na retenção de umidade e na proteção física das sementes podem produzir diferenças importantes na emergência e no recrutamento inicial (AGUIRRE; FERREIRA; KAGEYAMA, 2015). Estudos com cobertura morta, densidade de semeadura e protetores físicos mostram que o ambiente imediato em torno da semente pode favorecer ou restringir o sucesso da técnica, o que reforça a importância de práticas de manejo capazes de reduzir perdas logo após a implantação (SOUZA et al., 2021; FERREIRA; VIEIRA, 2024).

Mais recentemente, revisões sistemáticas produzidas no Brasil têm reforçado que o sucesso da semeadura direta depende da interação entre manejo e atributos de sementes e plântulas. Essa constatação é importante porque impede leituras simplificadas do método. A semeadura direta não falha ou funciona apenas porque foi adotada; seu desempenho é produzido pela combinação entre técnica, ambiente e espécies utilizadas. Esse entendimento é decisivo para interpretar as diferenças observadas em campo e para orientar estratégias de restauração mais eficientes (FERREIRA; VIEIRA, 2024).

2.2.4 Arranjo de espécies e implicações para o desempenho em restauração

A discussão sobre arranjo de espécies ganha importância quando a restauração passa a ser tratada como formação de comunidade, e não apenas como ocupação da área. Isso significa que a escolha das espécies não pode ser pensada somente de forma isolada; ela precisa considerar também como essas espécies serão combinadas e quais efeitos essa combinação pode produzir sobre a trajetória inicial da área restaurada. Em um contexto no qual a própria literatura já aponta limitações importantes na representatividade florística dos plantios de restauração da Mata Atlântica, discutir arranjo de espécies passa a ser discutir, ao mesmo tempo, desempenho em campo e qualidade ecológica da restauração (ALMEIDA et al., 2024).

Do ponto de vista ecológico, diferentes combinações de espécies podem alterar a estrutura inicial da comunidade e influenciar processos como sombreamento, ocupação do espaço e recrutamento subsequente de regenerantes. Estudos conduzidos em plantios de restauração da Mata Atlântica mostraram que determinadas espécies pioneiras dispersas por animais podem favorecer o aumento da regeneração inicial sob sua copa, indicando que os efeitos das espécies implantadas vão além de seu próprio crescimento e alcançam a dinâmica da comunidade em formação. Esse tipo de resultado é particularmente relevante para a restauração, porque sugere que a organização inicial das espécies pode interferir na trajetória ecológica da área (VIANI et al., 2015).

Ao mesmo tempo, a literatura não autoriza uma conclusão simplista de que maior diversidade inicial conduzirá, de forma automática, aos melhores resultados (ALMEIDA et al., 2024). A relação entre composição, desempenho das espécies e recuperação ecológica é mais complexa e depende das condições ambientais, da história de uso da área e do tempo transcorrido desde a implantação. Para estudos que comparam diferentes arranjos de espécies, isso é particularmente importante porque permite tratar o arranjo como uma hipótese ecológica a ser testada, e não como uma premissa já resolvida. Nesse sentido, avaliar o desempenho das espécies em diferentes combinações pode contribuir para entender melhor como o arranjo inicial interfere no estabelecimento e na estrutura da comunidade restaurada (VIANI et al., 2015).

2.3 INDICADORES DE DESEMPENHO DE ESPÉCIES ARBÓREAS EM ÁREAS EM RESTAURAÇÃO

A avaliação do desempenho de espécies arbóreas em áreas em restauração depende da definição de indicadores capazes de expressar, de forma consistente, a trajetória inicial da comunidade vegetal. Em restauração florestal, esse acompanhamento não se resume a verificar a presença das plantas na área. Ele envolve a leitura de atributos estruturais e funcionais que permitam compreender como a comunidade está se organizando e em que medida essa organização se aproxima dos objetivos ecológicos do projeto. Dentro dessa lógica, indicadores de densidade, crescimento, estrutura e serviços ecossistêmicos passaram a ocupar papel central nas avaliações de restauração da Mata Atlântica (OLIVEIRA et al., 2021).

No caso deste trabalho, essa discussão é especialmente pertinente porque o foco não está apenas na presença das espécies, mas no desempenho que elas apresentam em uma área restaurada por semeadura direta. Por isso, variáveis relacionadas ao estabelecimento e ao crescimento inicial dialogam diretamente com os objetivos do estudo (OLIVEIRA et al., 2021). Ao mesmo tempo, atributos ligados à biomassa, ao carbono e à densidade da madeira podem ampliar a interpretação dos resultados, pois conectam o comportamento das espécies a aspectos funcionais da restauração (GARDON et al., 2020). Assim, a escolha dos indicadores não é meramente operacional; ela define a forma como o desempenho das espécies será interpretado dentro da trajetória restaurativa.

2.3.1 Densidade de indivíduos e crescimento inicial

Densidade de indivíduos estabelecidos, altura e diâmetro figuram entre os indicadores mais diretos do desempenho inicial de espécies arbóreas em áreas em restauração. Essas variáveis permitem observar quantos indivíduos conseguiram permanecer na área após a implantação e em que medida avançaram em desenvolvimento. Em estágios iniciais da restauração, esse tipo de informação é particularmente valioso porque oferece uma leitura imediata da capacidade de estabelecimento das espécies e do avanço estrutural da comunidade em formação (OLIVEIRA et al., 2021).

No caso da semeadura direta, esses indicadores ganham ainda mais importância, já que a técnica depende justamente da formação de densidade suficiente de indivíduos e de crescimento inicial compatível com a consolidação da comunidade arbórea. Estudos de acompanhamento em áreas restauradas por semeadura direta mostram que a técnica pode resultar em boa ocupação inicial, mas com forte variação entre locais e espécies, o que torna a densidade e o crescimento inicial variáveis fundamentais para comparar desempenhos e interpretar a eficiência do método (FREITAS et al., 2019).

Além disso, a própria discussão sobre monitoramento da restauração na Mata Atlântica reforça a relevância de indicadores estruturais simples e robustos para acompanhar a trajetória das áreas nos primeiros anos. Para trabalhos que comparam espécies ou arranjos, essas variáveis têm vantagem adicional por permitirem interpretações diretas e biologicamente significativas, aproximando a leitura do campo da discussão ecológica sobre estabelecimento e desenvolvimento inicial (OLIVEIRA et al., 2021).

2.3.2 Densidade da madeira, biomassa e carbono

A inclusão de densidade da madeira, biomassa e carbono amplia a análise do desempenho das espécies porque introduz uma dimensão funcional à interpretação dos resultados. A densidade da madeira, por exemplo, está associada a diferenças ecológicas entre espécies e pode contribuir para compreender contrastes entre estratégias de crescimento, investimento estrutural e acúmulo de biomassa (NGUYEN et al., 2014). Embora nem sempre apareça isoladamente em estudos de monitoramento inicial, ela se torna especialmente relevante quando o objetivo é estimar biomassa e carbono a partir do desempenho das espécies estabelecidas (BERENGUER et al., 2018).

No caso da biomassa e do carbono, sua importância para a restauração florestal aumentou consideravelmente porque esses atributos conectam a recuperação da vegetação à prestação de serviços ecossistêmicos e à discussão sobre mitigação climática. Revisões voltadas à restauração no Brasil mostram que ainda existem lacunas metodológicas importantes nesse campo, mas também evidenciam sua relevância para interpretar o avanço funcional das áreas restauradas. Biomassa e carbono, nesse sentido, não substituem indicadores de estabelecimento e crescimento; eles os complementam, permitindo uma leitura mais abrangente do desempenho ecológico da comunidade em formação (GARDON et al., 2020).

Essa aproximação é particularmente pertinente em áreas jovens sob restauração, nas quais a estimativa de biomassa exige cuidados específicos. Estudos ressaltam a importância de empregar modelos alométricos e estimativas de teor de carbono ajustados a esse contexto, evitando extrapolações excessivamente genéricas. Para este trabalho, isso justifica o uso dessas variáveis como indicadores complementares: elas não deslocam o foco do estabelecimento das espécies, mas acrescentam uma camada interpretativa importante sobre o potencial funcional das espécies que conseguiram se manter e crescer na área restaurada (ZANINI et al., 2022).

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o estabelecimento, o crescimento e a contribuição estrutural e funcional de espécies arbóreas nativas em área de restauração florestal por semeadura direta na Floresta Estacional Semidecidual da Mata Atlântica, seis anos após a implantação.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar o experimento de semeadura direta existente, seis anos após a implantação, mensurando o crescimento dos indivíduos arbóreos estabelecidos;
- Determinar o percentual de estabelecimento das espécies, considerando o número total de sementes semeadas e o número de sementes viáveis;
- Quantificar a densidade de indivíduos estabelecidos por hectare e por metro linear;
- Mensurar o crescimento dos indivíduos arbóreos estabelecidos por meio da altura, do diâmetro e da área basal;
- Identificar as espécies com maior potencial de estabelecimento e desenvolvimento na área restaurada;
- Estimar a biomassa total e o estoque de carbono dos indivíduos amostrados, com base em variáveis dendrométricas e na densidade da madeira das espécies avaliadas.
- Avaliar indicadores econômicos associados à semeadura direta, considerando o custo com sementes por indivíduo estabelecido e por quilograma de carbono fixado.

4. MATERIAL E MÉTODOS

O presente estudo foi realizado a partir de um experimento de restauração florestal por semeadura direta implantado originalmente por Horle (2021), em sua dissertação de mestrado, no Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), campus Araras, SP, vinculado ao Laboratório de Silvicultura e Pesquisas Florestais (LASPEF). A área experimental possui 0,27 ha e está inserida em região de ocorrência de Floresta Estacional Semidecidual, formação associada ao bioma Mata Atlântica. O experimento foi implantado com 29 espécies arbóreas nativas,

semeadas em linhas alternadas com feijão-guandu, adotando espaçamento de 1,5 m entre linhas. A lista completa das espécies utilizadas na implantação original do experimento é apresentada no Apêndice A. A densidade inicial de semeadura das espécies arbóreas foi de 227.200 sementes por hectare.

A caracterização visual da área experimental apresentada nas Figuras 1 e 2 foi realizada a partir da aquisição de imagens aéreas RGB com drone DJI Mavic 3 Enterprise (M3E), equipado com módulo RTK e câmera wide com sensor CMOS 4/3 de 20 megapixels. O voo foi planejado e executado no aplicativo DJI Pilot 2, a 60 m de altura em relação ao solo, com sobreposição lateral de 70% e frontal de 80%. As imagens obtidas foram processadas no software Agisoft Metashape Professional, versão 2.2, seguindo o fluxo de trabalho de alinhamento das fotos, geração da nuvem de pontos densa, construção do Modelo Digital de Superfície (MDS) e geração do ortomosaico, com projeção WGS 84 / UTM zona 23S (AGISOFT LLC, 2024). Posteriormente, as parcelas experimentais foram delimitadas manualmente por meio de vetores sobre o ortomosaico no software QGIS 3.34. (QGIS.ORG, 2024).

Figura 1: Levantamento aéreo da área experimental com drone DJI Mavic 3 Enterprise.



Fonte: Elaborada pelo autor (2026), a partir de ortomosaico obtido por voo de drone.

A avaliação apresentada neste trabalho foi realizada seis anos após a implantação do experimento, com o objetivo de avaliar o estabelecimento e o desenvolvimento das espécies arbóreas

nativas semeadas diretamente na área. Foram considerados os indivíduos estabelecidos no campo, com registro da espécie, altura, diâmetro e posição experimental, permitindo a posterior estimativa de indicadores de estabelecimento, densidade, crescimento, biomassa, carbono e custos associados à semeadura direta.

Figura 2: Área experimental de restauração por semeadura direta



Fonte: elaborada pelo autor (2026), a partir de imagem obtida por voo de drone.

4.1 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

O experimento original foi composto por uma área de 0,27 ha, com dimensões aproximadas de 54 m × 50,2 m, dividida em seis blocos. Cada bloco continha quatro tratamentos, correspondentes a diferentes arranjos de riqueza de espécies arbóreas nativas: A = 7 espécies, B = 13 espécies, C = 21 espécies e D = 29 espécies. Cada tratamento foi constituído por três linhas de plantio, nas quais as espécies foram semeadas em diferentes combinações. A densidade de semeadura por espécie foi calculada visando o estabelecimento de 3.000 plântulas por hectare, distribuídas de forma equânime entre as espécies de cada tratamento. Para isso, utilizou-se o percentual de germinação informado

pelo viveiro e uma estimativa de 2% de estabelecimento de sementes viáveis em campo, conforme descrito por Horle (2021). No presente estudo, foram avaliados os indivíduos arbóreos estabelecidos em todos os blocos e tratamentos, considerando as espécies que permaneceram na área seis anos após a implantação.

4.2 COLETA DE DADOS

A coleta de dados foi realizada em todas as parcelas dos seis blocos, abrangendo os quatro tratamentos experimentais. Para cada indivíduo arbóreo estabelecido, foi registrada a espécie, o bloco, o tratamento, a linha de plantio e a posição do indivíduo na linha. A identificação das espécies foi feita em campo com base nas características morfológicas dos indivíduos e no histórico de espécies semeadas no experimento.

As variáveis dendrométricas avaliadas foram altura total, diâmetro a 30 cm do solo (D30), diâmetro ao nível do solo (DAS) e, quando aplicável, circunferência a 1,3 do solo (CAP). A altura total foi mensurada em metros, utilizando régua ou vara graduada (Figura 3), conforme o porte do indivíduo. Os diâmetros D30 e DAS foram obtidos em milímetros com paquímetro digital (Figuras 3-4). Para indivíduos cujo diâmetro não pôde ser mensurado adequadamente com o paquímetro, utilizou-se suta florestal para a medição do D30. Nos indivíduos de maior porte, a CAP foi mensurada em centímetros com fita métrica e depois convertida para diâmetro considerando uma seção circular. Quando havia mais de uma medida de diâmetro para o mesmo indivíduo, as áreas basais foram somadas e posteriormente convertidas para a obtenção de um diâmetro único equivalente.

Após a coleta, os dados (Figura 5) foram transferidos para planilhas eletrônicas, mantendo a identificação de cada indivíduo por espécie, bloco, tratamento, linha e ordem de ocorrência. Essa organização permitiu a conferência dos dados brutos, a padronização das unidades e a construção das tabelas utilizadas na análise dos resultados.

Figura 3: Medição altura e DAS



Fonte: elaborada pelo autor (2025).

Figura 4: Medição D30



Fonte: elaborada pelo autor (2025).

Figura 5: Tabelando Dados



Fonte: elaborada pelo autor (2026).

4.3 ESTIMATIVA DE BIOMASSA, CARBONO E DENSIDADE DA MADEIRA

A estimativa de biomassa foi realizada a partir da equação disponível em FERREZ et al. (2015), que considera as variáveis dendrométricas D30 e altura total e a densidade da madeira das espécies avaliadas. Os valores de densidade da madeira foram obtidos em bancos de dados científicos disponíveis online (ZANNE et al., 2009; DANTAS et al., 2024). A utilização da densidade da madeira como variável nas estimativas de biomassa é justificada por sua relação com estratégias funcionais das espécies arbóreas e com o acúmulo de biomassa lenhosa (CHAVE et al., 2009).

Inicialmente, foi calculada a área basal correspondente ao diâmetro a 30 cm do solo (D30), considerando os valores mensurados em milímetros. A área basal foi convertida de mm² para m² para utilização nas estimativas de biomassa.

A biomassa lenhosa acima do solo foi estimada a partir do modelo alométrico apresentado por Fereze et al. (2015), desenvolvido para plantios de restauração na Mata Atlântica. O modelo utiliza como variáveis independentes a área basal obtida a partir do D30, a altura total do indivíduo e a densidade da madeira da espécie. Foram aplicadas as seguintes equações:

- $\ln(AGBW) = 6,039 + 0,945 \times \ln(AS) + 0,961 \times \ln(Ht) + 1,022 \times \ln(\rho)$
- $\ln(CR) = -0,288 + 0,742 \times \ln(AGBW)$

- $C = 0,384 + 0,123 \times AGBW - 0,086 \times CR$
- $BT = AGBW + CR + C$

Em que: **(AGBW)** corresponde à biomassa lenhosa acima do solo; **(AS)** corresponde à área seccional ou área basal calculada a partir do D30; **(Ht)** corresponde à altura total; **(ρ)** corresponde à densidade da madeira; CR corresponde à biomassa de raízes grossas; C corresponde à biomassa de copa; e **(BT)** corresponde à biomassa total estimada.

Para as estimativas de carbono, foram considerados apenas os indivíduos com D30 superior a 3 cm, conforme critério adotado para inclusão nos cálculos. O carbono foi estimado a partir da biomassa total desses indivíduos, adotando-se o fator de conversão de 0,5, correspondente a 50% da biomassa seca, conforme abordagem utilizada em estimativas de carbono em áreas florestais sob restauração (ZANINI et al., 2022).

Os resultados foram organizados por espécie, considerando a biomassa média por indivíduo, o carbono médio por indivíduo e o carbono total fixado por espécie. Essa abordagem permitiu comparar espécies com diferentes padrões de estabelecimento e crescimento, distinguindo aquelas com maior número de indivíduos daquelas com maior contribuição estrutural e funcional para a área em restauração.

4.4 PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE DADOS

O processamento dos dados foi realizado em planilhas do Microsoft Excel. Inicialmente, os dados coletados em campo foram conferidos e organizados em uma planilha-base contendo as informações de identificação dos indivíduos e as variáveis mensuradas. Em seguida, foram utilizadas tabelas dinâmicas para sumarizar os dados por espécie, bloco, tratamento e demais categorias de interesse.

A partir das tabelas dinâmicas, foram calculados o número de indivíduos estabelecidos por espécie, a densidade de indivíduos por hectare, a densidade de plantas por metro linear, a altura média, a área basal média por indivíduo, a biomassa média, o carbono médio e o carbono total por espécie. Para as variáveis médias, os resultados foram apresentados acompanhados do erro-padrão, calculado a partir da variação dos indivíduos amostrados em cada espécie.

O percentual de estabelecimento foi calculado considerando a relação entre o número de indivíduos estabelecidos aos 72 meses e o número de sementes originalmente semeadas. Também foi calculado o estabelecimento com base no número de sementes viáveis, considerando o percentual de germinação de cada espécie informado pelo fornecedor de sementes (HORLE, 2021) permitindo uma avaliação mais ajustada ao potencial germinativo das espécies. As classes de estabelecimento em campo foram definidas com base nas categorias disponibilizadas pela Iniciativa Caminhos da Semente, utilizadas como referência técnica para interpretação do desempenho das espécies em semeadura direta (CAMINHOS DA SEMENTE, s.d.).

A densidade de indivíduos por hectare foi estimada a partir do número de indivíduos estabelecidos em relação à área efetivamente considerada para cada espécie no experimento. A densidade por metro linear foi calculada com base no número de indivíduos estabelecidos em relação ao comprimento de linhas em que a espécie foi semeada. Esses indicadores foram utilizados para complementar a interpretação do estabelecimento, pois permitem avaliar não apenas o número total de indivíduos, mas também sua distribuição em relação à área e às linhas de plantio.

A área basal média por indivíduo foi calculada a partir dos valores de diâmetro mensurados em campo, utilizando o diâmetro como base para estimar a seção transversal do caule. Esse indicador foi incluído por representar uma medida estrutural complementar à altura, permitindo comparar o desenvolvimento das espécies estabelecidas após seis anos da semeadura direta.

Quando necessário, foram elaborados gráficos do tipo boxplot no software R, com o objetivo de visualizar a distribuição dos dados entre espécies e tratamentos. Esses gráficos foram utilizados como ferramenta complementar à interpretação dos resultados, permitindo observar a variação, a mediana e a presença de valores extremos em variáveis como altura, área basal, biomassa e carbono por espécie. As análises gráficas não substituíram as tabelas-síntese, mas auxiliaram na comparação do desempenho das espécies estabelecidas após seis anos da semeadura direta.

4.5 INDICADORES ECONÔMICOS

Além dos indicadores ecológicos, foram calculados indicadores econômicos associados à semeadura direta, com base nos custos das sementes (HORLE, 2021) e nos dados de estabelecimento, biomassa e carbono. Para cada espécie, foi estimado o custo com sementes por indivíduo estabelecido e o custo com sementes por quilograma de carbono fixado. Esses indicadores foram utilizados como

complemento à avaliação do desempenho das espécies, permitindo relacionar o investimento inicial em sementes com os resultados obtidos após seis anos de implantação.

Os custos utilizados foram obtidos de HORLE (2021) e organizados em planilhas eletrônicas e associados aos dados de número de indivíduos estabelecidos e carbono total estimado por espécie. Dessa forma, foi possível identificar espécies com melhor relação entre custo, estabelecimento e contribuição para o estoque de carbono. Os valores econômicos foram tratados como indicadores complementares, não substituindo os critérios ecológicos de avaliação, mas contribuindo para uma análise mais integrada da eficiência da semeadura direta em restauração florestal.

5. RESULTADOS

72 meses após a implantação da semeadura direta indicou a presença de 5.219 plantas na área, de 13 espécies distintas, permitindo verificar quais espécies arbóreas nativas permaneceram estabelecidas em campo e como elas contribuíram para a estrutura inicial da área em restauração. Os resultados evidenciam diferenças expressivas entre as espécies, tanto em relação ao número de indivíduos estabelecidos quanto ao crescimento em altura e área basal. Essa variação demonstra que o desempenho das espécies não foi uniforme e que a avaliação da semeadura direta deve considerar, de forma integrada, indicadores de estabelecimento, densidade e desenvolvimento estrutural.

5.1 ESTABELECIMENTO, DENSIDADE E CRESCIMENTO DAS ESPÉCIES

A Tabela 1 apresenta os parâmetros de estabelecimento e desenvolvimento das espécies arbóreas nativas avaliadas aos 72 meses após a semeadura direta, incluindo número de indivíduos estabelecidos, percentual de estabelecimento, classe de estabelecimento em campo, densidade, plantas por metro linear, altura média e área basal média por indivíduo.

Tabela 1: Parâmetros de estabelecimento e desenvolvimento das espécies arbóreas aos 72 meses após a semeadura direta

Espécie	Família	Número de indivíduos estabelecidos	Estabelecimento geral (%)	Estabelecimento de sementes viáveis (%)	Classe de estabelecimento no campo	Densidade (indivíduos ha ⁻¹)	Plantas por metro linear	Altura Média (m)	Área basal média por indivíduo (mm ²)
<i>Anadenanthera colubrina</i>	Fabaceae	460	10,96	14,62	Baixa	1.697,4	0,38	3,68±0,10	44,23 ±4,26
<i>Astronium graveolens</i>	Anacardiaceae	285	6,79	9,06	Média	1.051,7	0,24	3,89±0,10	39,71 ±1,83
<i>Ceiba speciosa</i>	Malvaceae	92	4,06	5,81	Média	464,6	0,10	1,96±0,08	36,87 ±4,17
<i>Cybistax antisyphilitica</i>	Bignoniaceae	2	0,17	0,25	Muito baixa	15,0	0,00	3,10±1,70	16,06 ±10,56
<i>Enterolobium timbouva</i>	Fabaceae	549	15,70	17,45	Baixa	2.025,8	0,46	2,98±0,08	45,23 ±13,67
<i>Jacaranda cuspidifolia</i>	Bignoniaceae	483	22,86	30,48	Média	2.439,4	0,55	2,24±0,06	15,51 ±1,01
<i>Myracrodruon urundeuva</i>	Anacardiaceae	75	1,43	2,38	Muito baixa	276,8	0,06	4,07±0,26	39,52 ±5,02
<i>Peltophorum dubium</i>	Fabaceae	477	10,61	15,16	Média	1.760,1	0,40	5,03±0,11	80,93 ±3,52
<i>Platypodium elegans</i>	Fabaceae	276	22,27	34,25	Alta	2.075,2	0,48	2,28±0,07	9,78 ±0,84
<i>Pterogyne nitens</i>	Fabaceae	340	16,09	21,46	Média	1.717,2	0,39	2,11±0,07	9,52 ±0,78
<i>Sapindus saponaria</i>	Sapindaceae	2.165	34,40	68,80	Muito alta	7.988,9	1,80	1,32±0,02	3,02 ±0,11
<i>Solanum lycocarpum</i>	Solanaceae	3	0,07	0,10	Muito baixa	11,1	0,00	4,57±1,43	89,68 ±19,25
<i>Terminalia argentea</i>	Combretaceae	12	0,38	0,76	Muito baixa	60,6	0,01	1,73±0,31	11,15 ±3,88

Fonte: elaborado pelo autor (2026), com classes de estabelecimento adaptadas de Caminhos da Semente (s.d.).

Embora o experimento tenha sido originalmente implantado com 29 espécies arbóreas nativas, aos 72 meses após a semeadura direta foram registradas apenas 13 espécies. Esse resultado indica que parte das espécies semeadas não permaneceu representada na comunidade avaliada, evidenciando diferenças no estabelecimento e na permanência das espécies ao longo do período de desenvolvimento. Entre as espécies estabelecidas, *Sapindus saponaria* apresentou o maior número de indivíduos, com 2.165 indivíduos estabelecidos, seguida por *Enterolobium timbouva*, com 549 indivíduos, *Jacaranda cuspidifolia*, com 483 indivíduos, *Peltophorum dubium*, com 477 indivíduos, e *Anadenanthera colubrina*, com 460 indivíduos. Juntas, essas cinco espécies concentraram a maior parte dos indivíduos estabelecidos (79,21% do total), indicando que a comunidade formada por semeadura direta apresentou composição inicial bastante desigual entre as espécies avaliadas.

Para as 13 espécies amostradas, o estabelecimento geral (considerando o total de sementes) variou de 0,07% a 34,40%, demonstrando grande diferença entre espécies. *Sapindus saponaria* apresentou o maior percentual de estabelecimento geral, com 34,40%, além do maior estabelecimento considerando sementes viáveis, com 68,80%, sendo classificada como de estabelecimento muito alto. Esse resultado evidencia que a espécie apresentou elevada eficiência de estabelecimento nas condições da área experimental. *Platypodium elegans*, *Jacaranda cuspidifolia* e *Pterogyne nitens* também se destacaram quanto ao estabelecimento, especialmente quando considerada a proporção de sementes viáveis, com 34,25%, 30,48% e 21,46%, respectivamente. Esses valores indicam que essas espécies também apresentaram bom desempenho relativo na fase de permanência em campo.

Por outro lado, *Cybistax antisyphilitica*, *Solanum lycocarpum* e *Terminalia argentea* apresentaram os menores valores de estabelecimento, com número reduzido de indivíduos e percentuais inferiores a 1%. Esse resultado indica baixa representatividade dessas espécies na comunidade estabelecida aos 72 meses. A baixa densidade dessas espécies limita sua contribuição para a ocupação da área e sugere menor desempenho em relação às demais espécies avaliadas, ao menos nas condições específicas do experimento.

A análise da densidade reforça a diferença de desempenho entre as espécies. *Sapindus saponaria* apresentou a maior densidade, com 7.988,9 indivíduos ha⁻¹, e o maior número de plantas por metro linear, com 1,80 planta.m⁻¹. Esse padrão mostra que a espécie teve papel predominante na ocupação da área. *Jacaranda cuspidifolia*, *Platypodium elegans*, *Enterolobium timbouva*, *Peltophorum dubium*, *Pterogyne nitens* e *Anadenanthera colubrina* também apresentaram densidades

relevantes, todas acima de 1.600 indivíduos ha^{-1} . Esses resultados indicam que, embora *Sapindus saponaria* tenha sido dominante em número de indivíduos, outras espécies também contribuíram de forma importante para a formação da comunidade arbórea estabelecida.

Entretanto, o desempenho em densidade não correspondeu necessariamente ao maior desenvolvimento estrutural dos indivíduos. *Sapindus saponaria*, apesar de apresentar o maior número de indivíduos e a maior densidade, registrou a menor altura média entre as espécies mais abundantes, com $1,32 \pm 0,02$ m, e uma das menores áreas basais médias, com $3,02 \pm 0,11$ mm^2 por indivíduo. Esse resultado mostra que a espécie teve destaque principalmente pelo estabelecimento e pela ocupação da área, mas não pelo porte médio dos indivíduos aos seis anos.

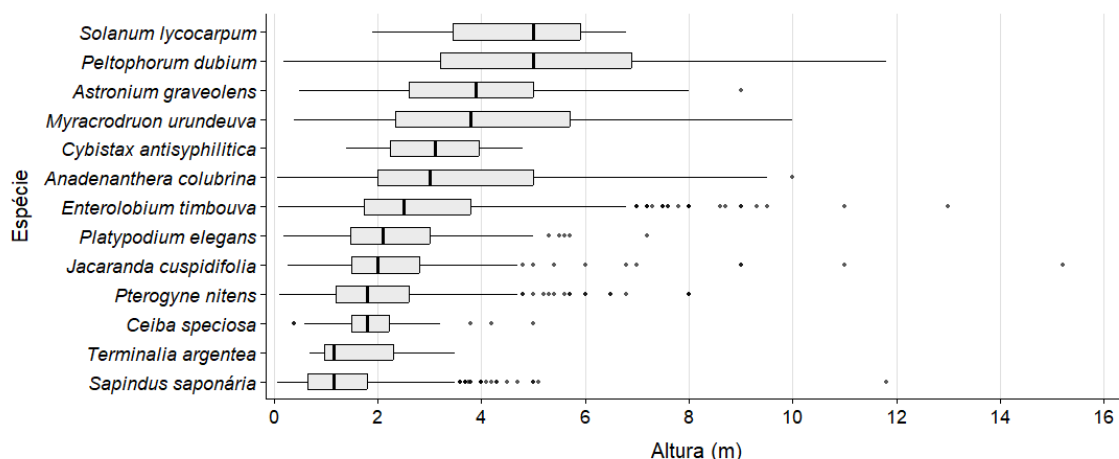
Em contraste, *Peltophorum dubium* apresentou o melhor desempenho em crescimento estrutural, com a maior altura média, de $5,03 \pm 0,11$ m, e uma das maiores áreas basais médias por indivíduo, de $80,93 \pm 3,52$ mm^2 . Esse resultado indica que, embora a espécie não tenha sido a mais abundante, apresentou elevado desenvolvimento individual e importante contribuição para a estrutura da área restaurada.

Myracrodruon urundeuva, *Astronium graveolens* e *Anadenanthera colubrina* também apresentaram alturas médias elevadas, com $4,07 \pm 0,26$ m, $3,89 \pm 0,10$ m e $3,68 \pm 0,10$ m, respectivamente, indicando bom crescimento em altura entre os indivíduos estabelecidos.

Solanum lycocarpum apresentou altura média de $4,57 \pm 1,43$ m e a maior área basal média por indivíduo, com $89,68 \pm 19,25$ mm^2 . No entanto, esse resultado deve ser interpretado com cautela, pois a espécie apresentou apenas três indivíduos estabelecidos. Assim, apesar do elevado porte médio dos indivíduos remanescentes, sua baixa densidade reduz sua representatividade na área como um todo. Esse caso evidencia a importância de analisar conjuntamente os indicadores de crescimento e estabelecimento, evitando interpretações baseadas apenas em médias individuais.

A distribuição da altura dos indivíduos estabelecidos por espécie é apresentada na Figura 6, com as espécies ordenadas pela mediana da altura, permitindo visualizar a variação intraespecífica e as diferenças no padrão de crescimento entre as espécies avaliadas, em complemento aos valores apresentados na Tabela 1.

Figura 6: Distribuição da altura dos indivíduos estabelecidos por espécie aos 72 meses após a semeadura direta.



Fonte: elaborado pelo autor (2026).

A Figura 6 evidencia diferenças no padrão de crescimento em altura entre as espécies avaliadas. *Peltophorum dubium*, *Solanum lycocarpum*, *Astronium graveolens* e *Myracrodruon urundeuva* apresentaram maior distribuição de indivíduos em classes superiores de altura, enquanto *Sapindus saponaria*, apesar da elevada abundância, concentrou maior parte dos indivíduos em menores alturas. Esse padrão reforça que a maior densidade de indivíduos não correspondeu, necessariamente, ao maior desenvolvimento em altura.

De modo geral, os resultados da Tabela 1 mostram que as espécies avaliadas apresentaram diferentes estratégias de contribuição para a área em restauração. *Sapindus saponaria* se destacou pelo estabelecimento, densidade e ocupação linear; *Peltophorum dubium* se destacou pelo crescimento em altura e área basal; enquanto *Enterolobium timbouva*, *Anadenanthera colubrina*, *Astronium graveolens*, *Jacaranda cuspidifolia*, *Platypodium elegans* e *Pterogyne nitens* apresentaram desempenho intermediário ou complementar em diferentes indicadores. Dessa forma, a reavaliação aos 72 meses evidencia que o sucesso da semeadura direta não pode ser interpretado apenas pelo número de indivíduos estabelecidos, mas pela combinação entre estabelecimento, densidade e desenvolvimento estrutural das espécies.

5.2 BIOMASSA, CARBONO E INDICADORES ECONÔMICOS POR ESPÉCIE

A biomassa média por indivíduo foi utilizada como indicador do acúmulo médio de matéria vegetal dos indivíduos avaliados, enquanto as estimativas de carbono foram realizadas considerando

apenas os indivíduos com D30 superior a 3 cm, conforme critério adotado para inclusão nos cálculos. Assim, dos 5.219 indivíduos estabelecidos aos 72 meses, 1.526 (29,24 %) foram incluídos nas estimativas de carbono (Tabela 2).

Os percentuais indicados entre parênteses na coluna de carbono médio por indivíduo representam a proporção de indivíduos de cada espécie considerada nas estimativas de carbono em relação ao total de indivíduos estabelecidos da própria espécie. Esses indicadores complementam a avaliação da semeadura direta, pois permitem diferenciar espécies que se destacaram pela permanência em campo daquelas que apresentaram maior contribuição estrutural, funcional e econômica para a área em restauração.

Tabela 2: Estimativas de biomassa, carbono e indicadores econômicos por espécie, 72 meses após

Espécie	Biomassa média por indivíduo (kg)	Carbono médio por indivíduo (kg)	Carbono total estimado por espécie (kg C)	Custo com sementes por kg de carbono fixado (R\$ kg ⁻¹ C)	Custo por indivíduo estabelecido (R\$ indivíduo ⁻¹)
<i>Anadenanthera colubrina</i>	22,27 ±2,10	11,13 ±1,05 (53,70%)	2.749,75	8,06	0,20
<i>Astronium graveolens</i>	12,47±0,61	6,24 ±0,30 (75,79%)	1.346,96	3,72	0,08
<i>Ceiba speciosa</i>	3,48±0,39	1,74 ±0,19 (58,70%)	93,93	33,02	0,62
<i>Cybistax antispyllitica</i>	4,95±0,00	2,47 ±0,00 (50%)	2,47	3,22	3,99
<i>Enterolobium timbouva</i>	18,91±4,73	9,45 ±2,37 (37,52%)	1.947,51	30,94	0,53
<i>Jacaranda cuspidifolia</i>	4,58±0,53	2,29 ±0,26 (31,68%)	348,07	5,31	0,03
<i>Myracrodruon urundeuva</i>	18,78±2,26	9,39 ±1,13 (58,67%)	413,08	2,25	0,28
<i>Peltophorum dubium</i>	22,91±1,04	11,45 ±0,52 (81,97%)	4.478,07	4,09	0,10
<i>Platypodium elegans</i>	4,98±0,44	2,49 ±0,22 (20,29%)	139,45	38,81	0,35
<i>Pterogyne nitens</i>	5,93±0,84	2,97 ±0,42 (20,88%)	210,56	16,35	0,14
<i>Sapindus saponaria</i>	3,39±0,32	1,70 ±0,16 (3,74%)	137,34	317,19	0,25
<i>Solanum lycocarpum</i>	14,50±6,30	7,25 ±3,15 (100%)	21,75	0,96	2,33
<i>Terminalia argentea</i>	5,31±0,52	2,66 ±0,26 (25%)	7,97	88,19	19,52

a semeadura direta

Fonte: elaborado pelo autor (2026).

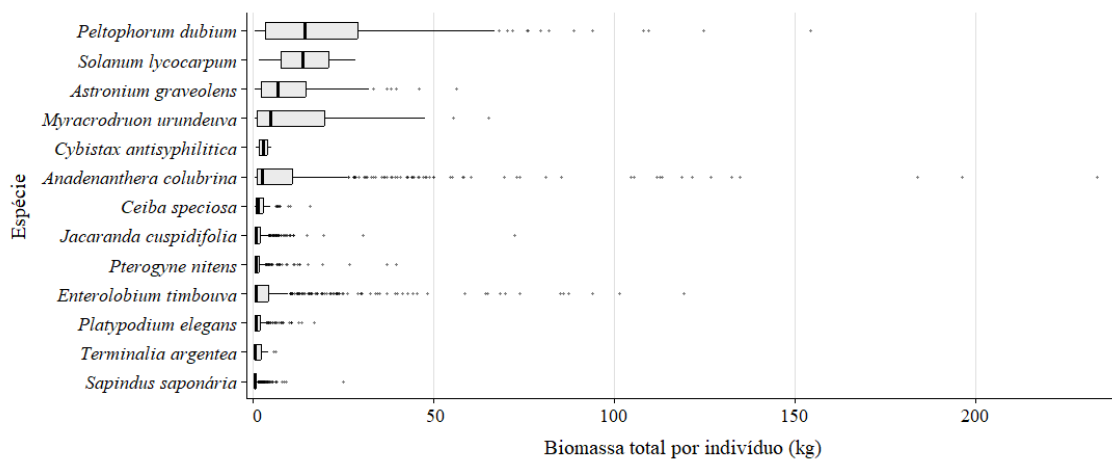
Nota: As estimativas de carbono foram realizadas considerando apenas os indivíduos com D30 superior a 3 cm. Os percentuais entre parênteses na coluna “Carbono médio por indivíduo” indicam a proporção de indivíduos de cada espécie incluída nas estimativas de carbono em relação ao total de indivíduos estabelecidos da própria espécie.

As estimativas de biomassa média por indivíduo evidenciaram diferenças expressivas no desenvolvimento estrutural das espécies estabelecidas com biomassa estimada. *Peltophorum dubium* apresentou a maior biomassa média por indivíduo, com $22,91 \pm 1,04$ kg, seguido por *Anadenanthera colubrina*, com $22,27 \pm 2,10$ kg, *Enterolobium timbouva*, com $18,91 \pm 4,73$ kg, e *Myracrodruon urundeuva*, com $18,78 \pm 2,26$ kg. Esses resultados indicam que essas espécies apresentaram maior acúmulo médio de matéria vegetal por indivíduo, representando maior contribuição individual para a estruturação da área restaurada.

A distribuição da biomassa total por indivíduo entre as espécies é apresentada na Figura 7, com as espécies ordenadas pela mediana da biomassa. O boxplot complementa os valores médios apresentados na Tabela 2, permitindo visualizar a variação intraespecífica e a presença de indivíduos com maior acúmulo de biomassa.

A Figura 7 reforça as diferenças de acúmulo de biomassa entre as espécies avaliadas. *Peltophorum dubium* apresentou maior distribuição de indivíduos em classes superiores de biomassa, seguido por espécies como *Solanum lycocarpum*, *Astronium graveolens* e *Myracrodruon urundeuva*. Em contraste, *Sapindus saponaria*, apesar da elevada abundância, concentrou maior parte dos indivíduos em baixos valores de biomassa individual, reforçando que a maior densidade não correspondeu, necessariamente, à maior contribuição estrutural por indivíduo.

Figura 7: Distribuição da biomassa total por indivíduo das espécies estabelecidas aos 72 meses após a semeadura direta.



Fonte: elaborado pelo autor (2026).

O carbono médio por indivíduo acompanhou o padrão observado para a biomassa média, uma vez que foi estimado a partir da biomassa total individual dos indivíduos que atenderam ao critério de D30 superior a 3 cm. *Peltophorum dubium* apresentou o maior carbono médio por indivíduo, com $11,45 \pm 0,52$ kg, seguido por *Anadenanthera colubrina*, com $11,13 \pm 1,05$ kg, *Enterolobium timbouva*, com $9,45 \pm 2,37$ kg, e *Myracrodruon urundeuva*, com $9,39 \pm 1,13$ kg. Esse resultado mostra que as espécies com maior biomassa média também apresentaram maior contribuição média para o carbono por indivíduo, reforçando a relação entre desenvolvimento estrutural e acúmulo de carbono na biomassa vegetal.

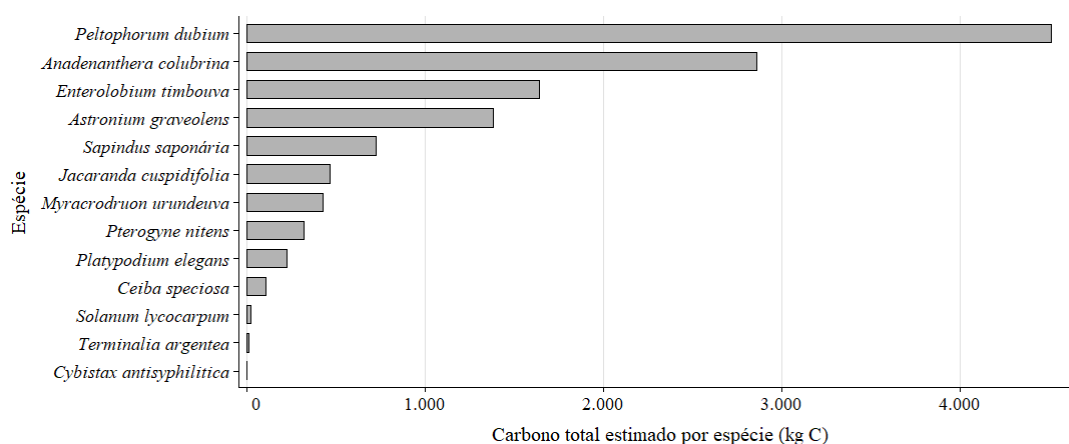
A proporção de indivíduos incluídos nas estimativas de carbono variou consideravelmente entre as espécies. *Peltophorum dubium* apresentou 81,97% dos indivíduos estabelecidos com D30 superior a 3 cm, enquanto *Astronium graveolens*, *Ceiba speciosa*, *Myracrodruon urundeuva* e *Anadenanthera colubrina* apresentaram 75,79%, 58,70%, 58,67% e 53,70%, respectivamente. Esses valores indicam que, nessas espécies, maior parte ou parcela expressiva dos indivíduos estabelecidos atingiu o critério mínimo utilizado para as estimativas de carbono. Em contraste, *Sapindus saponaria*, apesar de apresentar o maior número de indivíduos estabelecidos, teve apenas 3,74% dos indivíduos

incluídos nas estimativas de carbono, indicando que a maior parte de seus indivíduos ainda apresentava D30 inferior a 3 cm no momento da avaliação.

Quando analisado o carbono total estimado por espécie, *Peltophorum dubium* apresentou a maior contribuição, com 4.478,07 kg C, mesmo não sendo a espécie com maior número de indivíduos estabelecidos. Em seguida, destacaram-se *Anadenanthera colubrina*, com 2.749,75 kg C, *Enterolobium timbouva*, com 1.947,51 kg C, e *Astronium graveolens*, com 1.346,96 kg C. Esse resultado mostra que a contribuição total para o estoque de carbono dependeu não apenas do número de indivíduos estabelecidos, mas também da proporção de indivíduos que atingiu D30 superior a 3 cm e da biomassa acumulada por indivíduo.

A contribuição total de carbono estimada por espécie é apresentada na Figura 8. O gráfico complementa os valores da Tabela 2 ao evidenciar a participação relativa das espécies no estoque total de carbono estimado para a área avaliada.

Figura 8: Carbono total estimado por espécie aos 72 meses após a semeadura direta.



Fonte: elaborado pelo autor (2026).

A Figura 8 evidencia a predominância de *Peltophorum dubium* no carbono total estimado, seguida por *Anadenanthera colubrina*, *Enterolobium timbouva* e *Astronium graveolens*. Esse padrão reforça que a contribuição funcional das espécies depende da combinação entre número de indivíduos, desenvolvimento estrutural e biomassa acumulada, e não apenas da densidade de indivíduos estabelecidos.

O contraste entre *Sapindus saponaria* e *Peltophorum dubium* resume uma das principais respostas observadas no conjunto dos resultados. *Sapindus saponaria* apresentou a maior abundância e a maior densidade de indivíduos, conforme observado na Tabela 1, porém apenas 3,74% dos seus indivíduos foram incluídos nas estimativas de carbono. A espécie apresentou biomassa média por indivíduo de $3,39 \pm 0,32$ kg e carbono total estimado de 137,34 kg C. Por outro lado, *Peltophorum dubium* apresentou menor número de indivíduos estabelecidos, mas 81,97% deles atenderam ao critério de D30 superior a 3 cm, resultando na maior biomassa média por indivíduo e no maior carbono total estimado por espécie. Esse resultado demonstra que o sucesso da semeadura direta não deve ser avaliado apenas pela quantidade de indivíduos estabelecidos, mas também pelo desenvolvimento estrutural e pela contribuição funcional das espécies ao longo do tempo.

Esse mesmo padrão também pode ser observado ao comparar espécies com abundância intermediária. *Jacaranda cuspidifolia* apresentou número elevado de indivíduos estabelecidos e alta densidade, mas apenas 31,68% dos indivíduos foram incluídos nas estimativas de carbono, com biomassa média por indivíduo de $4,58 \pm 0,53$ kg e carbono total estimado de 348,07 kg C. Em contraste, *Astronium graveolens* apresentou menor número de indivíduos estabelecidos, porém 75,79% deles atenderam ao critério utilizado para estimativa de carbono, resultando em carbono total estimado de 1.346,96 kg C. Esses resultados reforçam que a contribuição funcional das espécies depende da combinação entre abundância, desenvolvimento estrutural, biomassa acumulada e proporção de indivíduos aptos a entrar nas estimativas de carbono.

As espécies com baixa densidade devem ser interpretadas com cautela. *Solanum lycocarpum* apresentou 100% dos indivíduos incluídos nas estimativas de carbono, biomassa média por indivíduo de $14,50 \pm 6,30$ kg e carbono médio de $7,25 \pm 3,15$ kg por indivíduo. No entanto, esse resultado corresponde a apenas três indivíduos estabelecidos, o que resultou em carbono total estimado de 21,75 kg C. De forma semelhante, *Cybistax antisyphilitica* e *Terminalia argentea* apresentaram baixa contribuição para o carbono total, com 2,47 kg C e 7,97 kg C, respectivamente. Assim, percentuais elevados de inclusão ou valores médios individuais altos podem não representar contribuição expressiva para a área quando a espécie apresenta poucos indivíduos estabelecidos.

Os indicadores econômicos também apresentaram variação entre as espécies. O menor custo com sementes por indivíduo estabelecido foi observado para *Jacaranda cuspidifolia*, com R\$ 0,03 por indivíduo, seguido por *Astronium graveolens*, com R\$ 0,08, *Peltophorum dubium*, com R\$ 0,10, *Pterogyne nitens*, com R\$ 0,14, e *Anadenanthera colubrina*, com R\$ 0,20. Esses valores indicam que

essas espécies apresentaram melhor relação entre o custo das sementes e o número de indivíduos estabelecidos aos 72 meses, sendo mais eficientes quando o critério considerado é o estabelecimento de plantas na área.

Quando considerado o custo com sementes por quilograma de carbono fixado, os menores valores foram observados para *Solanum lycocarpum*, com R\$ 0,96 kg⁻¹ C, *Myracrodruon urundeuva*, com R\$ 2,25 kg⁻¹ C, *Cybistax antisyphilitica*, com R\$ 3,22 kg⁻¹ C, *Astronium graveolens*, com R\$ 3,72 kg⁻¹ C, *Peltophorum dubium*, com R\$ 4,09 kg⁻¹ C, e *Jacaranda cuspidifolia*, com R\$ 5,31 kg⁻¹ C. No entanto, para espécies com poucos indivíduos estabelecidos, como *Solanum lycocarpum* e *Cybistax antisyphilitica*, esses valores devem ser avaliados com cuidado, pois a baixa representatividade dessas espécies reduz a segurança da interpretação econômica em escala da área. Nesses casos, o baixo custo por quilograma de carbono pode refletir o elevado porte de poucos indivíduos, e não necessariamente um desempenho consistente da espécie no conjunto da restauração.

Por outro lado, espécies como *Peltophorum dubium*, *Astronium graveolens*, *Anadenanthera colubrina* e *Enterolobium timbouva* apresentaram desempenho mais consistente quando considerados conjuntamente os indicadores de estabelecimento, biomassa média por indivíduo, proporção de indivíduos incluídos nas estimativas de carbono, carbono total e custo. *Peltophorum dubium* se destacou pela maior biomassa média por indivíduo, pela maior proporção de indivíduos com D30 superior a 3 cm entre as espécies mais abundantes e pelo maior carbono total estimado por espécie. *Anadenanthera colubrina* e *Enterolobium timbouva* também contribuíram de forma relevante para o carbono total, enquanto *Astronium graveolens* combinou boa proporção de indivíduos incluídos nas estimativas de carbono, carbono total expressivo e baixo custo por indivíduo estabelecido.

De modo geral, os resultados da Tabela 2 mostram que o desempenho das espécies na semeadura direta não deve ser interpretado apenas pelo número total de indivíduos estabelecidos. A avaliação conjunta da biomassa média por indivíduo, da proporção de indivíduos com D30 superior a 3 cm, do carbono total estimado por espécie e dos indicadores econômicos permitiu diferenciar espécies com maior capacidade de ocupação da área daquelas com maior contribuição estrutural e funcional. Assim, os resultados indicam que algumas espécies, embora menos abundantes, exerceram papel mais expressivo na estruturação da área restaurada e no acúmulo de carbono após seis anos da implantação, enquanto outras se destacaram principalmente pela eficiência de estabelecimento ou pelo menor custo por indivíduo estabelecido.

5.3 INDICADORES AGREGADOS DA ÁREA RESTAURADA

Após a análise dos indicadores por espécie, os resultados foram sintetizados em escala agregada por hectare, permitindo avaliar o desempenho geral da área restaurada por semeadura direta aos 72 meses após a implantação. Essa síntese reúne indicadores estruturais, funcionais e econômicos, possibilitando relacionar a densidade de indivíduos estabelecidos, a área basal, o estoque de carbono estimado e os custos associados à implantação. Dessa forma, a Tabela 3 permite observar não apenas o desempenho individual das espécies, mas o resultado geral obtido pela comunidade arbórea estabelecida na área experimental, extrapolado para a escala de um hectare.

Tabela 3: Indicadores agregados de desenvolvimento, custo e carbono, 72 meses após a semeadura direta

Custo médio por ha (R\$ ha ⁻¹)	Área basal (m ² ha ⁻¹)	Densidade (indivíduos ha ⁻¹)	Custo médio por indivíduo estabelecido (R\$ indivíduo ⁻¹)	Estoque de carbono por ha (Mg C ha ⁻¹)	Incremento anual de carbono (Mg C ha ⁻¹ ano ⁻¹)	Custo médio da tonelada de carbono (R\$ Mg ⁻¹ C)
12.060,54	0,45	19.329,63	0,62	44,06	7,34	273,71

Fonte: elaborado pelo autor (2026).

Nota: O custo médio por hectare considera os custos do projeto, incluindo materiais, máquinas e demais operações de implantação. Os valores foram baseados na dissertação de referência do experimento e convertidos para reais pela taxa de câmbio de R\$5,23 para US\$1,00, em 20/07/2021. Os indicadores de densidade, área basal e carbono foram extrapolados para 1 ha a partir da área experimental avaliada, de 0,27 ha.

A área reavaliada apresentou densidade estimada de 19.329,63 indivíduos ha⁻¹ aos 72 meses após a semeadura direta. Esse valor foi obtido a partir dos 5.219 indivíduos estabelecidos na área experimental de 0,27 ha e indica elevada ocupação da área por indivíduos arbóreos nativos. Esse resultado reforça que a semeadura direta possibilitou a formação de uma comunidade arbórea numericamente expressiva após seis anos de implantação, mesmo considerando que o estabelecimento foi concentrado em parte das espécies originalmente semeadas.

A área basal estimada foi de $0,45 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$. Esse indicador complementa a densidade, pois representa a contribuição estrutural dos indivíduos estabelecidos a partir da seção transversal dos caules. Assim, enquanto a densidade expressa a quantidade de indivíduos por hectare, a área basal indica o desenvolvimento estrutural agregado da comunidade. A combinação entre elevada densidade e área basal ainda reduzida indica que a área apresenta grande número de indivíduos estabelecidos, mas com estrutura arbórea ainda em desenvolvimento, o que é coerente com uma área de restauração avaliada seis anos após a implantação por semeadura direta.

O custo médio por hectare foi de R\$12.060,54. Considerando a densidade estimada de $19.329,63 \text{ indivíduos ha}^{-1}$, o custo médio por indivíduo estabelecido foi de R\$ 0,62. Esse resultado indica uma relação favorável entre o custo de implantação e o número de indivíduos que permaneceram estabelecidos na área aos 72 meses. Dessa forma, o indicador evidencia a eficiência da semeadura direta quando o critério analisado é a formação de densidade de indivíduos arbóreos por unidade de área.

O estoque de carbono estimado foi de $44,06 \text{ Mg C ha}^{-1}$. Esse valor representa a extrapolação para um hectare do carbono acumulado na biomassa estimada dos indivíduos que atenderam ao critério de inclusão nas estimativas de carbono. O incremento anual médio de carbono foi de $7,34 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, calculado pela divisão do estoque de carbono estimado pelo período de seis anos após a implantação. Esse indicador permite visualizar a contribuição média anual da área restaurada para o acúmulo de carbono no período avaliado.

O custo médio da tonelada de carbono foi estimado em R\$ $273,71 \text{ Mg}^{-1} \text{ C}$. Esse valor relaciona o custo médio por hectare ao estoque de carbono estimado por hectare, permitindo avaliar a eficiência econômica da restauração em relação ao carbono acumulado. Assim, a Tabela 3 mostra que a semeadura direta apresentou não apenas elevada densidade de indivíduos estabelecidos, mas também contribuição funcional associada ao estoque de carbono e uma relação econômica que integra custo de implantação e resultado ecológico obtido.

De modo geral, os indicadores agregados demonstram que a área restaurada por semeadura direta apresentou alta densidade de indivíduos estabelecidos, custo médio reduzido por indivíduo e estoque de carbono relevante aos 72 meses após a implantação. Esses resultados complementam as análises por espécie apresentadas nas Tabelas 1 e 2, pois mostram que o desempenho da restauração deve ser interpretado em duas escalas: a escala das espécies, que evidencia diferenças de estabelecimento, crescimento, biomassa e carbono; e a escala da área, que expressa o resultado geral

da comunidade arbórea formada. Portanto, a Tabela 3 sintetiza a contribuição estrutural, funcional e econômica da semeadura direta na área avaliada.

6. DISCUSSÃO

6.1 ESTABELECIMENTO E PERMANÊNCIA DAS ESPÉCIES APÓS SEIS ANOS

A reavaliação da área aos 72 meses após a implantação demonstrou que a semeadura direta foi capaz de formar uma comunidade arbórea estabelecida, porém com forte seletividade entre as espécies originalmente semeadas. A permanência de 13 espécies das 29 implantadas evidencia que a composição inicial da semeadura não se converteu integralmente na comunidade avaliada após seis anos. Esse resultado indica a atuação de filtros ecológicos sucessivos, nos quais germinação, emergência, sobrevivência, competição e crescimento influenciam quais espécies permanecem representadas na área ao longo do tempo.

Esse comportamento é coerente com a natureza da semeadura direta, uma vez que as sementes são introduzidas diretamente no campo e as fases iniciais de desenvolvimento ocorrem sob condições ambientais menos controladas do que no plantio de mudas (ENGEL; PARROTTA, 2001; SOUZA; ENGEL, 2023). Assim, o desempenho observado aos seis anos não reflete apenas o potencial germinativo das espécies, mas a capacidade de atravessar diferentes etapas do processo de estabelecimento em ambiente real (FREITAS et al., 2019). Essa interpretação concorda com estudos que apontam grande variação no sucesso da semeadura direta em função das espécies utilizadas, da qualidade das sementes, das condições locais e do manejo da área (FERREIRA; VIEIRA, 2024).

A diferença entre o número de espécies semeadas e o número de espécies estabelecidas também mostra a importância de avaliações em médio prazo. Em experimentos de restauração por sementes, a emergência inicial pode indicar resposta positiva em curto prazo, mas não garante permanência, crescimento ou contribuição estrutural posterior (FREITAS et al., 2019). Dessa forma, a reavaliação aos 72 meses permite uma leitura mais consistente do desempenho das espécies, pois considera não apenas a instalação inicial dos indivíduos, mas sua permanência e desenvolvimento na trajetória de restauração. Esse ponto é especialmente relevante para orientar a escolha de espécies em futuros projetos de semeadura direta, evitando que decisões técnicas sejam baseadas apenas em respostas iniciais de emergência ou estabelecimento precoce (LAUMANN et al., 2023; SOUZA; ENGEL, 2024).

6.2 DIFERENÇAS ENTRE DENSIDADE, CRESCIMENTO E CONTRIBUIÇÃO FUNCIONAL

O desempenho das espécies variou conforme o indicador analisado. *Sapindus saponaria* destacou-se pela abundância, densidade e ocupação linear, indicando elevada capacidade de permanência na área. Em restauração por semeadura direta, espécies com esse comportamento podem contribuir para o preenchimento inicial do espaço e para a formação de uma comunidade arbórea numericamente expressiva, sobretudo considerando que parte das sementes semeadas não resulta em indivíduos estabelecidos.

Entretanto, a dominância numérica de *Sapindus saponaria* não correspondeu ao maior desenvolvimento estrutural. A espécie apresentou baixa altura média, baixa área basal média e pequena proporção de indivíduos com D30 superior a 3 cm. Isso indica que sua principal contribuição, no período avaliado, esteve associada à ocupação da área, e não ao porte médio dos indivíduos ou ao acúmulo de biomassa. Esse resultado é importante porque mostra que densidade elevada, isoladamente, não é suficiente para definir maior desempenho ecológico em restauração. A contagem de indivíduos precisa ser analisada em conjunto com medidas de crescimento, diâmetro e estrutura, pois espécies muito abundantes podem apresentar contribuição funcional limitada quando a maior parte dos indivíduos permanece em classes menores de tamanho (OLIVEIRA et al., 2021).

Em sentido complementar, *Peltophorum dubium* apresentou menor abundância que *Sapindus saponaria*, mas maior contribuição estrutural. A espécie se destacou pela altura média, área basal, biomassa média por indivíduo e carbono total estimado, além de apresentar elevada proporção de indivíduos com D30 superior a 3 cm. Esse resultado indica que *Peltophorum dubium* não apenas permaneceu na área, mas também avançou em desenvolvimento estrutural de forma expressiva. Em áreas em restauração, espécies com esse tipo de comportamento são relevantes porque contribuem para o aumento da complexidade da comunidade, para o acúmulo de biomassa e para a formação de estrutura arbórea mais consistente ao longo do tempo.

O contraste entre *Sapindus saponaria* e *Peltophorum dubium* resume um dos principais achados do estudo: espécies podem exercer funções distintas dentro da mesma área restaurada. Enquanto *Sapindus saponaria* contribuiu principalmente para a densidade e ocupação inicial, *Peltophorum dubium* apresentou maior peso na estruturação da vegetação e no acúmulo de carbono. Esse resultado reforça que a avaliação da semeadura direta deve integrar abundância, crescimento,

área basal, biomassa e carbono, distinguindo espécies importantes para o preenchimento da área daquelas com maior contribuição estrutural e funcional.

Além dessas duas espécies, *Anadenanthera colubrina*, *Enterolobium timbouva* e *Astronium graveolens* também apresentaram respostas relevantes. *Anadenanthera colubrina* combinou número expressivo de indivíduos estabelecidos com elevada biomassa média e carbono total estimado. *Enterolobium timbouva* contribuiu tanto para a densidade quanto para o estoque de carbono, embora com menor proporção de indivíduos incluídos nas estimativas de carbono em comparação com espécies de maior desenvolvimento médio. *Astronium graveolens*, mesmo com menor abundância, apresentou boa proporção de indivíduos com D30 superior a 3 cm, carbono total expressivo e baixo custo por indivíduo estabelecido. Esses resultados indicam que espécies de densidade intermediária podem ter papel importante quando combinam permanência, crescimento e contribuição funcional.

Por outro lado, espécies com baixa representatividade, como *Cybistax antisiphilitica*, *Solanum lycocarpum* e *Terminalia argentea*, devem ser interpretadas com cautela. *Solanum lycocarpum*, por exemplo, apresentou valores médios elevados de altura, área basal, biomassa e carbono por indivíduo, mas esses resultados foram baseados em apenas três indivíduos estabelecidos. Isso limita sua interpretação em escala da área, pois poucos indivíduos de grande porte podem elevar médias individuais sem representar contribuição expressiva para a comunidade como um todo. Esse caso reforça a necessidade de avaliar simultaneamente médias individuais e número de indivíduos estabelecidos, evitando conclusões baseadas apenas em valores médios.

6.3 BIOMASSA, CARBONO E DESEMPENHO ECONÔMICO DA SEMEADURA DIRETA

A inclusão de biomassa e carbono ampliou a interpretação do desempenho das espécies, pois permitiu avaliar a contribuição funcional da comunidade estabelecida (GARDON et al., 2020). Enquanto os indicadores de estabelecimento mostram quais espécies permaneceram na área, as estimativas de biomassa e carbono indicam quais espécies contribuíram de forma mais expressiva para o acúmulo de matéria vegetal e carbono (ZANINI et al., 2021). Essa distinção é fundamental na restauração florestal, pois a recuperação da vegetação não se limita à presença de indivíduos, mas envolve também a retomada gradual de atributos estruturais e funcionais associados à complexidade da comunidade e à prestação de serviços ecossistêmicos (ZANINI et al., 2022).

A proporção de indivíduos incluídos nas estimativas de carbono foi decisiva para compreender as diferenças entre espécies. O critério de D30 superior a 3 cm permitiu identificar quais indivíduos já apresentavam desenvolvimento suficiente para entrada nos cálculos de carbono, separando espécies com grande número de indivíduos pequenos daquelas com maior proporção de indivíduos estruturalmente mais desenvolvidos. Nesse sentido, *Sapindus saponaria*, apesar de sua alta densidade, apresentou baixa proporção de indivíduos incluídos nas estimativas de carbono, o que ajuda a explicar sua menor contribuição para o carbono total. Em contrapartida, *Peltophorum dubium* e *Astronium graveolens* apresentaram proporções mais elevadas de indivíduos aptos ao cálculo, refletindo maior avanço estrutural de parte significativa de suas populações.

A análise econômica acrescentou uma dimensão prática à interpretação dos resultados ao relacionar o custo das sementes ao desempenho obtido após seis anos. Em escala agregada, o baixo custo médio por indivíduo estabelecido indica boa eficiência da semeadura direta para formação de densidade arbórea. Contudo, a análise por espécie mostrou que a eficiência econômica depende do indicador considerado. Espécies como *Jacaranda cuspidifolia*, *Astronium graveolens*, *Peltophorum dubium* e *Anadenanthera colubrina* apresentaram baixo custo por indivíduo estabelecido, enquanto o custo por quilograma de carbono fixado favoreceu espécies com maior acúmulo de biomassa ou maior porte individual.

Essa diferença mostra que o custo-benefício da semeadura direta depende do objetivo do projeto de restauração. Quando o objetivo principal é formar densidade de indivíduos, espécies com baixo custo por indivíduo estabelecido podem ser estratégicas. Quando o foco inclui estruturação da vegetação e acúmulo de carbono, espécies com maior biomassa média e maior proporção de indivíduos estruturalmente desenvolvidos passam a ter maior relevância. Assim, a análise econômica não deve ser utilizada isoladamente para definir espécies superiores, mas associada aos indicadores ecológicos e funcionais. Esse tipo de leitura integrada é importante para a restauração da Mata Atlântica, onde a eficiência operacional precisa estar associada à qualidade ecológica e à representatividade funcional das comunidades restauradas (ALMEIDA et al., 2024; ALMEIDA et al., 2025).

6.4 SÍNTESE DO DESEMPENHO DA ÁREA RESTAURADA

Os indicadores agregados por hectare confirmam que a semeadura direta apresentou resultado positivo em relação ao estabelecimento, que levou a uma elevada densidade de indivíduos

estabelecidos e custo por indivíduo. A densidade estimada de 19.329,63 indivíduos ha^{-1} mostra que a técnica possibilitou elevada ocupação da área por indivíduos arbóreos, porém, indica que o potencial de estabelecimento no campo das espécies semeadas foi subestimado, já que a semeadura buscava uma densidade de 3.000 plantas. ha^{-1} . Na prática, para uma maior eficiência, as 5.219 plantas amostradas na área poderiam estar ocupando 1,7 ha, caso tivéssemos uma densidade de 3.000 plantas. ha^{-1} .

Ao mesmo tempo, o custo médio de R\$0,62 por indivíduo estabelecido indica uma relação favorável entre investimento e permanência de plantas no campo. Esses resultados reforçam o potencial da semeadura direta como alternativa operacionalmente eficiente para formação de comunidades arbóreas em áreas de restauração. Entretanto, vale ressaltar que o custo por indivíduo estabelecido é baixo, mas em parte porque há uma grande quantidade de indivíduos por hectare, além do desejado. Desse modo, os custos por indivíduo podem representar uma visão enviesada do custo da prática, que deve ser também representado pelo custo por hectare. Entretanto, a área basal estimada de 0,45 $\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$ indica que, apesar da elevada densidade, a estrutura da comunidade ainda está em desenvolvimento. Esse padrão é coerente com uma área jovem em restauração, na qual muitos indivíduos permanecem em classes menores de diâmetro e altura, enquanto parte das espécies começa a se diferenciar estruturalmente. Com o avanço do tempo, processos como crescimento, competição, mortalidade natural e diferenciação entre espécies tendem a modificar a densidade e a estrutura da comunidade. Portanto, a alta densidade observada deve ser interpretada como um indicador positivo de ocupação, mas não como sinal de estrutura florestal plenamente consolidada. Além disso, a alta densidade pode sugerir que desbastes sejam necessários para amenizar a competição entre os indivíduos na linha e liberar espaço para que os indivíduos remanescentes se desenvolvam, aumentando a área basal e a biomassa da área. Desbastes são operações custosas, por isso, práticas futuras devem tentar adequar as densidades de semeadura para evitar que isto seja necessário. Os resultados também alertam para a necessidade de um bom planejamento da semeadura considerando os reais estabelecimentos que as espécies arbóreas nativas têm nas áreas de restauração via semeadura. Nesse sentido, esse estudo gera dados importantes sobre estas espécies para serem considerados na prática da semeadura direta na Mata Atlântica.

O estoque de carbono estimado de 44,06 Mg C ha^{-1} e o incremento anual médio de 7,34 $\text{Mg C ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ indicam contribuição funcional relevante da área após seis anos de implantação. Esses valores demonstram que, além de formar uma comunidade numericamente expressiva, a semeadura direta também resultou em acúmulo de carbono na biomassa dos indivíduos que atingiram o critério

de inclusão nas estimativas. Esse resultado é importante porque conecta a restauração a funções ecossistêmicas mais amplas, especialmente aquelas relacionadas ao acúmulo de biomassa e à mitigação de impactos ambientais.

De modo geral, os resultados demonstram que a semeadura direta foi eficiente para formar uma comunidade arbórea estabelecida, mas com desempenhos distintos entre espécies e indicadores. *Sapindus saponaria* foi importante para a densidade e a ocupação da área; *Peltophorum dubium* se destacou pela estrutura, biomassa e carbono; e *Anadenanthera colubrina*, *Enterolobium timbouva* e *Astronium graveolens* apresentaram contribuições relevantes em diferentes dimensões da restauração. Assim, o desempenho da semeadura direta deve ser compreendido como resultado da combinação entre estabelecimento, crescimento, contribuição funcional e eficiência econômica. Essa abordagem integrada permite identificar espécies promissoras e reforça a importância de monitoramentos em médio prazo para orientar decisões técnicas em restauração por sementes nativas.

7. CONCLUSÃO

A semeadura direta possibilitou o estabelecimento de uma comunidade arbórea nativa na área de restauração avaliada aos 72 meses após a implantação. Das 29 espécies originalmente semeadas, 13 permaneceram representadas na área, totalizando 5.219 indivíduos estabelecidos. Esse resultado demonstra que a técnica apresentou capacidade de formar elevada densidade arbórea, embora o desempenho tenha sido seletivo entre as espécies ao longo do período de desenvolvimento.

As espécies avaliadas contribuíram de formas distintas para a restauração. *Sapindus saponaria* destacou-se pelo estabelecimento, pela densidade e pela ocupação linear, indicando importância para o preenchimento da área. Em contrapartida, *Peltophorum dubium* apresentou maior contribuição estrutural e funcional, com destaque para altura média, área basal, biomassa média por indivíduo e carbono total estimado por espécie. *Anadenanthera colubrina*, *Enterolobium timbouva* e *Astronium graveolens* também apresentaram desempenho relevante, contribuindo em diferentes proporções para o desenvolvimento da comunidade arbórea.

A integração entre indicadores de estabelecimento, crescimento, biomassa, carbono e custo permitiu uma avaliação mais completa do desempenho das espécies. Essa abordagem evidenciou que espécies abundantes podem ser importantes para a ocupação inicial da área, enquanto espécies com maior crescimento individual podem exercer papel mais expressivo na estruturação da vegetação e no acúmulo de carbono.

Conclui-se que a reavaliação em médio prazo é fundamental para compreender a trajetória de áreas implantadas por semeadura direta, pois permite identificar quais espécies permanecem, crescem e contribuem efetivamente para a restauração. Assim, a seleção de espécies para projetos com sementes nativas deve considerar não apenas o estabelecimento inicial, mas também o desenvolvimento estrutural, a contribuição funcional e a relação entre custo e resultado obtido ao longo do tempo.

REFERÊNCIAS

- AGISOFT LLC. *Agisoft Metashape User Manual: Professional Edition, Version 2.2*. [S.l.]: Agisoft LLC, 2024. Disponível em: https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_2_2_en.pdf. Acesso em: 17 jun. 2026.
- AGUIRRE, A. G.; FERREIRA, R. A.; KAGEYAMA, P. Y. Potencial da semeadura direta na restauração florestal de pastagem abandonada no município de Piracaia, SP, Brasil. *Hoehnea*, v. 42, n. 4, p. 629-640, 2015.
- ALMEIDA, C. de; REID, J. L.; LIMA, R. A. F. de; PINTO, L. F. G.; VIANI, R. A. G. Restoration plantings in the Atlantic Forest use a small, biased, and homogeneous set of tree species. *Forest Ecology and Management*, v. 553, art. 121628, 2024. DOI: 10.1016/j.foreco.2023.121628.
- ALMEIDA, C. de; REID, J. L.; LIMA, R. A. F. de; PINTO, L. F. G.; VIANI, R. A. G. High-diversity Atlantic Forest restoration plantings fail to represent local floras. *Perspectives in Ecology and Conservation*, v. 23, n. 1, p. 6-11, 2025. DOI: 10.1016/j.pecon.2024.12.001.
- BERENGUER, E. et al. Seeing the woods through the saplings: using wood density to assess the recovery of human-modified Amazonian forests. *Journal of Ecology*, v. 106, n. 6, p. 2190-2203, 2018.
- CAMINHOS DA SEMENTE. Lista de espécies para restauração ecológica com semeadura direta. São Paulo: Caminhos da Semente, s.d. Disponível em: <https://caminhosdasemente.org.br/especies>. Acesso em: 08 jan. 2026.
- CHAVE, J.; COOMES, D.; JANSEN, S.; LEWIS, S. L.; SWENSON, N. G.; ZANNE, A. E. Towards a worldwide wood economics spectrum. *Ecology Letters*, v. 12, n. 4, p. 351-366, 2009. DOI: 10.1111/j.1461-0248.2009.01285.x.
- DANTAS, V.; OLIVEIRA, L.; SONSIN-OLIVEIRA, J.; MARCATI, C. Data from: Coordination of bark and wood traits underlies forest-to-savanna evolutionary transitions. *Dryad*, 2024. DOI: 10.5061/dryad.1ns1rn92j.
- ENGEL, V. L.; PARROTTA, J. A. An evaluation of direct seeding for reforestation of degraded lands in central São Paulo state, Brazil. *Forest Ecology and Management*, v. 152, n. 1-3, p. 169-181, 2001. DOI: 10.1016/S0378-1127(00)00600-9.

FEREZ, A. P. C.; CAMPOE, O. C.; MENDES, J. C. T.; STAPE, J. L. Silvicultural opportunities for increasing carbon stock in restoration of Atlantic forests in Brazil. *Forest Ecology and Management*, v. 350, p. 40-45, 2015. DOI: 10.1016/j.foreco.2015.04.015.

FERREIRA, M. C.; VIEIRA, D. L. M. Making the most of native seeds: management techniques interact with seed and seedling traits for enhancing direct seeding success. *Forest Ecology and Management*, v. 574, art. 122353, 2024. DOI: 10.1016/j.foreco.2024.122353.

FREITAS, M. G.; RODRIGUES, S. B.; CAMPOS-FILHO, E. M.; CARMO, G. H. P.; VEIGA, J. M.; JUNQUEIRA, R. G. P.; VIEIRA, D. L. M. Evaluating the success of direct seeding for tropical forest restoration over ten years. *Forest Ecology and Management*, v. 438, p. 224-232, 2019. DOI: 10.1016/j.foreco.2019.02.024.

FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA; INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. Atlas da Mata Atlântica 2023-2024. São Paulo: Fundação SOS Mata Atlântica; São José dos Campos: INPE, 2025. Disponível em: <https://www.sosma.org.br/iniciativas/atlas-da-mata-atlantica>. Acesso em: 12 maio 2026.

GARDON, F. R.; SANTOS, R. F.; RODRIGUES, R. R. Brazil's forest restoration, biomass and carbon stocks: a critical review of the knowledge gaps. *Forest Ecology and Management*, v. 462, art. 117972, 2020. DOI: 10.1016/j.foreco.2020.117972.

HORLE, Daniel Carlos. Semeadura direta para restauração de floresta tropical: efeitos de arranjos de espécies no estabelecimento e crescimento inicial da comunidade arbórea. 2021. 47 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura e Ambiente) – Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Ambiente, Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de São Carlos, Araras, 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Manual técnico da vegetação brasileira: sistema fitogeográfico, inventário das formações florestais e campestres, técnicas e manejo de coleções botânicas, procedimentos para mapeamentos. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2012. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv63011.pdf>. Acesso em: 30 mar. 2026.

LAUMANN, P. D. et al. Germination traits explain the success of direct seeding restoration in the seasonal tropics of Brazil. *Forest Ecology and Management*, v. 529, art. 120706, 2023. DOI: 10.1016/j.foreco.2022.120706.

MAPBIOMAS. Relatório anual do desmatamento no Brasil 2024. São Paulo: MapBiomas, 2025. Disponível em: <https://alerta.mapbiomas.org/relatorio/>. Acesso em: 12 maio 2026.

MELI, P. et al. Optimizing seeding density of fast-growing native trees for restoring the Brazilian Atlantic Forest. *Restoration Ecology*, v. 26, n. 2, p. 212-219, 2018. DOI: 10.1111/rec.12567.

NGUYEN, H. et al. Wood density: a tool to find complementary species for the design of mixed-species plantations. *Forest Ecology and Management*, v. 334, p. 106-113, 2014.

OLIVEIRA, R. E. de; ENGEL, V. L.; LOIOLA, P. de P.; MORAES, L. F. D. de; VISMARA, E. de S. Top 10 indicators for evaluating restoration trajectories in the Brazilian Atlantic Forest. *Ecological Indicators*, v. 127, art. 107652, 2021. DOI: 10.1016/j.ecolind.2021.107652.

QGIS.ORG. *QGIS 3.34 Geographic Information System User Guide*. QGIS Association, 2024. Disponível em: https://docs.qgis.org/3.34/en/docs/user_manual/index.html. Acesso em: 17 jun. 2026.

RIBEIRO, M. C.; METZGER, J.-P.; MARTENSEN, A. C.; PONZONI, F. J.; HIROTA, M. M. The Brazilian Atlantic Forest: how much is left, and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation. *Biological Conservation*, v. 142, n. 6, p. 1141-1153, 2009. DOI: 10.1016/j.biocon.2009.02.021.

RIBEIRO, V. C.; MASSI, K. G. Testing different monitoring protocols for restoration sites in highlands of southeast Atlantic Forest biome. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 35, e85491, p. 1-21, 2025. DOI: 10.5902/1980509885491.

RODRIGUES, R. R.; LIMA, R. A. F.; GANDOLFI, S.; NAVE, A. G. On the restoration of high diversity forests: 30 years of experience in the Brazilian Atlantic Forest. *Biological Conservation*, v. 142, n. 6, p. 1242-1251, 2009. DOI: 10.1016/j.biocon.2008.12.008.

ROMANELLI, J. P. et al. Biodiversity responses to restoration across the Brazilian Atlantic Forest. *Science of the Total Environment*, v. 821, art. 153403, 2022. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.153403.

SOUZA, D. C. de et al. Direct seeding to restore tropical seasonal forests: effects of green manure and hydrogel amendment on tree species performances and weed infestation. *Restoration Ecology*, v. 29, n. 1, e13277, 2021.

SOUZA, D. C. de; ENGEL, V. L. Advances, challenges, and directions for ecological restoration by direct seeding of trees: lessons from Brazil. *Biological Conservation*, v. 284, art. 110172, 2023. DOI: 10.1016/j.biocon.2023.110172.

SOUZA, D. C. de; ENGEL, V. L. Seed functional traits as predictors of seedling establishment success in Brazilian tropical forest restoration. *Biotropica*, v. 56, n. 4, e13355, 2024. DOI: 10.1111/btp.13355.

VANCINE, M. H. et al. The Atlantic Forest of South America: spatiotemporal dynamics of the vegetation and implications for conservation. *Biological Conservation*, v. 291, art. 110499, 2024. DOI: 10.1016/j.biocon.2024.110499.

VIANI, R. A. G.; VIDAS, N. B.; PARDI, M. M.; CASTRO, D. C. V.; GUSSON, E.; BRANCALION, P. H. S. Animal-dispersed pioneer trees enhance the early regeneration in Atlantic Forest restoration plantations. *Natureza & Conservação*, v. 13, n. 1, p. 41-46, 2015. DOI: 10.1016/j.ncon.2015.03.005.

ZANINI, A. M.; GANDE, L. B.; ROCHA, G. P. E.; PADOVEZI, A.; FARAH, F. T.; RODRIGUES, R. R. The effect of ecological restoration methods on carbon stocks in the Brazilian Atlantic Forest. *Forest Ecology and Management*, v. 481, art. 118734, 2021. DOI: 10.1016/j.foreco.2020.117972.

ZANINI, A. M.; MAYRINCK, R. C.; VIEIRA, S. A.; RODRIGUES, R. R. Carbon content and allometric models to estimate aboveground biomass for forest areas under restoration. *Restoration Ecology*, v. 30, n. 5, e13591, 2022. DOI: 10.1111/rec.13591.

ZANNE, A. E.; LOPEZ-GONZALEZ, G.; COOMES, D. A.; ILIC, J.; JANSEN, S.; LEWIS, S. L.; MILLER, R. B.; SWENSON, N. G.; WIEMANN, M. C.; CHAVE, J. Data from: Towards a worldwide wood economics spectrum. Dryad, 2009. DOI: 10.5061/dryad.234.

APÊNDICE A – LISTA DAS ESPÉCIES ARBÓREAS NATIVAS UTILIZADAS NA IMPLANTAÇÃO DO EXPERIMENTO

Tabela S1: Espécies arbóreas nativas utilizadas na implantação original do experimento de semeadura direta.

Espécie	Família
<i>Albizia niopoides</i>	Fabaceae
<i>Anadenanthera colubrina</i>	Fabaceae
<i>Apeiba tibourbou</i>	Malvaceae
<i>Astronium graveolens</i>	Anacardiaceae
<i>Balfourodendron riedelianum</i>	Rutaceae
<i>Cedrela fissilis</i>	Meliaceae
<i>Ceiba speciosa</i>	Malvaceae
<i>Citharexylum myrianthum</i>	Verbenaceae
<i>Colubrina glandulosa</i>	Rhamnaceae
<i>Cordia sellowiana</i>	Boraginaceae
<i>Cordia trichotoma</i>	Boraginaceae
<i>Cybistax antisiphilitica</i>	Bignoniaceae
<i>Enterolobium timbouva</i>	Fabaceae
<i>Gallesia integrifolia</i>	Phytolaccaceae
<i>Genipa americana</i>	Rubiaceae
<i>Helietta apiculata</i>	Rutaceae
<i>Jacaranda cuspidifolia</i>	Bignoniaceae
<i>Maclura tinctoria</i>	Moraceae
<i>Myracrodruon urundeuva</i>	Anacardiaceae
<i>Myroxylon peruiferum</i>	Fabaceae
<i>Peltophorum dubium</i>	Fabaceae

Espécie	Família
<i>Platypodium elegans</i>	Fabaceae
<i>Psidium guajava</i>	Myrtaceae
<i>Pterogyne nitens</i>	Fabaceae
<i>Sapindus saponaria</i>	Sapindaceae
<i>Schinus terebinthifolia</i>	Anacardiaceae
<i>Solanum lycocarpum</i>	Solanaceae
<i>Terminalia argentea</i>	Combretaceae
<i>Zanthoxylum rhoifolium</i>	Rutaceae

Fonte: adaptado de Horle (2021).