

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA AGRONÔMICA

ALINE HIPANANIRO APOLINÁRIO JOSÉ

**INCREMENTO DE BIOMASSA E CARBONO DE ESPÉCIES
ARBÓREAS USADAS NA RESTAURAÇÃO DA MATA ATLÂNTICA**

Araras-SP
2025

ALINE HIPANANIRO APOLINÁRIO JOSÉ

**INCREMENTO DE BIOMASSA E CARBONO DE ESPÉCIES ARBÓREAS
USADAS NA RESTAURAÇÃO DA MATA ATLÂNTICA**

Trabalho Final de Graduação apresentado ao Departamento de Biotecnologia e Produção Vegetal e Animal do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de São Carlos, como requisito para obtenção de título de Bacharel em Engenharia Agrônômica.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Augusto Gorne Viani

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, que me sustentou ao longo desta jornada. Agradeço à minha família que, mesmo não podendo estar comigo presencialmente, sempre me apoiou e incentivou. Agradeço aos integrantes do LASPEF, pelo apoio, pelas trocas e pela colaboração, fundamentais para a realização deste trabalho.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Ricardo Viani, pela orientação, disponibilidade e paciência ao longo do processo. Seus conselhos foram decisivos para o avanço do trabalho e para a condução mais segura de cada etapa desta jornada.

Agradeço também aos meus amigos pelo suporte durante esta trajetória, em especial à Gabriela Vendite, por ter sido presença constante e apoio importante ao longo de nossa caminhada acadêmica.

Por fim, agradeço à Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), Centro de Ciências Agrárias (CCA), *Campus Araras*, e a todos os professores que contribuíram para minha formação. Sem a oportunidade oferecida e o conhecimento transmitido ao longo da graduação, nada disso teria sido possível.

RESUMO

A mitigação das mudanças climáticas demanda, além da redução de emissões, o fortalecimento de sumidouros de carbono por meio de estratégias como a restauração ecológica. No Brasil, a Mata Atlântica permanece altamente fragmentada, com remanescentes maduros restritos a uma parcela reduzida da área do bioma, o que reforça a relevância de iniciativas de conservação e restauração. Este trabalho quantificou o estoque e o incremento de biomassa e carbono de espécies arbóreas em área em restauração florestal da Mata Atlântica, aos 4 anos (53 meses) após o plantio, com base em equações alométricas adequadas para florestas jovens no bioma. Foram mensurados diâmetros a 30 cm do solo e altura total, e estimadas as biomassas por espécie; o carbono foi obtido a partir da biomassa. O sistema apresentou estoque médio de biomassa de 51,3 Mg.ha⁻¹ e estoque médio de carbono de 25,6 Mg.ha⁻¹, resultando em incremento médio anual de 5,8 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹. Observou-se variação no estoque e incremento de biomassa e carbono entre espécies, indicando diferenças de desempenho e potencial de contribuição para o sequestro de carbono nos primeiros anos de implantação da área de restauração. Estes resultados eram esperados devido à diferença de traços funcionais entre as espécies. *Guazuma ulmifolia* foi a espécie que apresentou maior estoque e incremento de biomassa e carbono devido ao seu crescimento rápido, sendo recomendada para captura de carbono em áreas jovens, enquanto a *Cariniana legalis* apresentou os menores teores. Os resultados gerados contribuem para futuras ações de restauração, especialmente as que têm foco na captura de carbono.

Palavras-chave: árvores; florestas tropicais; mitigação; mudanças climáticas; reflorestamento.

ABSTRACT

Climate change mitigation requires not only reducing emissions but also strengthening carbon sinks through strategies such as ecological restoration. In Brazil, the Atlantic Forest remains highly fragmented, with mature remnants restricted to a small portion of the biome's legally defined area, reinforcing the importance of conservation and restoration efforts. This study quantified biomass and carbon stocks and their increments for tree species in an Atlantic Forest restoration area four years (53 months) after establishment, using allometric equations suitable for young forests within the biome. Diameter at 30 cm above ground and total height were measured, and biomass was estimated by species; carbon was derived from biomass. The system reached a mean biomass stock of 51.3 Mg ha⁻¹ and a mean carbon stock of 25.6 Mg C ha⁻¹, resulting in a mean annual carbon increment of 5.8 Mg C ha⁻¹ year⁻¹. Species-level variation was observed, with a wide range of individual biomass and annual carbon increments, indicating differences in early performance and contribution to short-term carbon gains during the initial years of restoration. *Guazuma ulmifolia* showed the highest biomass and carbon stock and increment due to its rapid growth, being recommended for carbon capture in young restoration areas, whereas *Cariniana legalis* presented the lowest values. The results contribute to future restoration actions, particularly those focused on carbon sequestration.

Keywords: trees; tropical forests; mitigation; climate change; reforestation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Área da coleta de dados no CCA-UFSCar, Araras-SP, destacado em vermelho.	15
Figura 2. a) Canos utilizados para medição de altura; b) Medição de altura.	19
Figura 3. a) Paquímetro, SUTA e fitas métricas; b) Medição de diâmetro à 30 cm do solo.	20
Figura 4. Biomassa por espécie*.	24
Figura 5. Carbono por espécie*.	25
Figura 6. Incremento anual de biomassa por espécie*.	27
Figura 7. Incremento anual de carbono por espécie*.	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Espécies implantadas na área de restauração florestal experimental no CCA-UFSCar, Araras-SP, e número de indivíduos amostrados por espécie. **16**

Tabela 2. Médias de Área basal (m^2) calculadas a partir do diâmetro à 30 cm do solo (D30) e altura (H); densidade da madeira (ρ); medianas de Biomassa Total (Kg), Estoque de Carbono (Kg) Incremento de Biomassa ($kg \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$), Incremento de Carbono ($kg \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$) e letras de comparação estatísticas das 24 espécies implantadas na área de restauração experimental da UFSCar – Araras. Letras distintas indicam diferença significativa ($p > 0,05$) **31**

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1 MUDANÇAS CLIMÁTICAS E MITIGAÇÃO	4
2.2 MATA ATLÂNTICA: FRAGMENTAÇÃO, REMANESCENTES E RESTAURAÇÃO	5
2.3 BIOMASSA FLORESTAL E CARBONO	8
2.4 EQUAÇÕES ALOMÉTRICAS PARA ESTIMATIVA DE BIOMASSA EM RESTAURAÇÃO	11
3 OBJETIVOS	14
3.1 OBJETIVO GERAL	14
3.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
4 MATERIAL E MÉTODOS	15
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	15
4.2 ESPÉCIES AVALIADAS	16
4.3 COLETA DE DADOS DENDROMÉTRICOS E CRITÉRIOS DE INCLUSÃO	19
4.4 ESTIMATIVA DE BIOMASSA E CARBONO	21
4.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA	22
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	33
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	34

1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas constituem um desafio central para sociedades contemporâneas, com impactos sobre a biodiversidade, a produção de alimentos, a disponibilidade hídrica, a saúde pública e a estabilidade econômica. Evidências científicas consolidadas indicam que o aquecimento global observado decorre, em grande parte, do aumento das concentrações atmosféricas de gases de efeito estufa (GEE) associado às atividades humanas, o que demanda estratégias articuladas de mitigação e adaptação (IPCC, 2023). Nesse contexto, o Acordo de Paris estabeleceu como um dos seus objetivos manter o aumento da temperatura média global abaixo de 2 °C e envidar esforços para limitá-lo a 1,5 °C, em relação aos níveis pré-industriais, sem vincular tal objetivo a um ano específico de curto prazo (UNFCCC, 2015).

A mitigação climática envolve múltiplas frentes e não pode ser compreendida como um fenômeno restrito ao desmatamento. Embora mudanças no uso da terra sejam relevantes em vários países, as emissões globais e nacionais se relacionam também de forma expressiva aos setores de energia, transportes, processos industriais, agricultura e resíduos, exigindo intervenções estruturais e políticas integradas (IPCC, 2023). Paralelamente, cresce o reconhecimento do papel das soluções baseadas na natureza, que incluem a conservação de ecossistemas e a restauração ecológica, capazes de contribuir para remoções de CO₂ e para a provisão de serviços ecossistêmicos, como proteção do solo, regulação hidrológica e ganhos de biodiversidade (IPCC, 2023; Vendite; Oliveira, 2025).

No âmbito dessas soluções, a restauração ecológica é entendida como um processo planejado que busca reativar trajetórias ecológicas e recuperar atributos estruturais e funcionais de ecossistemas degradados. Padrões internacionais destacam que restauração não se limita ao plantio de árvores, tampouco deve ser tratada como uma ação simples ou automática: envolve definição de metas, seleção adequada de espécies e arranjos, condução e manutenção, além de monitoramento baseado em indicadores e avaliação de resultados ao longo do tempo (Gann et al., 2019). Essa distinção conceitual é importante, pois “recuperação” pode ser utilizada de modo genérico, enquanto “restauração” se refere a intervenções orientadas por princípios ecológicos e metas explícitas de reestruturação do ecossistema.

No Brasil, a Mata Atlântica representa um bioma fortemente impactado pela

conversão de vegetação nativa e fragmentação de habitats ao longo de séculos. Estudos de referência indicam que a cobertura florestal remanescente varia conforme critérios e escalas de mapeamento, situando-se aproximadamente entre 11% e 16% do bioma, com predominância de pequenos fragmentos e intensa pressão antrópica, o que compromete a conectividade e a manutenção de processos ecológicos (Ribeiro et al., 2009). Nesse cenário, ações de conservação e restauração são estratégicas para conter perdas adicionais, recompor paisagens e recuperar funções ecossistêmicas, inclusive relacionadas ao ciclo do carbono.

A agenda de restauração também se articula a compromissos nacionais e instrumentos de política pública. O Plano Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa (PLANAVEG) organiza diretrizes para ampliar a restauração e a recomposição de vegetação nativa, integrando instrumentos de implementação e monitoramento (Brasil, 2017). Além do potencial climático, a restauração em paisagens agrícolas pode contribuir para reduzir erosão, melhorar infiltração e regular microclima, beneficiando sistemas produtivos e serviços ambientais (IPCC, 2023). No entanto, para que tais benefícios sejam demonstráveis e comparáveis, é necessário produzir evidências quantitativas sobre desempenho dos plantios em diferentes contextos.

Apesar do avanço das iniciativas de restauração, ainda há lacunas sobre estoques e incrementos de biomassa e carbono em áreas restauradas, especialmente nos primeiros anos após a implantação. Esse período é crítico, pois concentra desafios de estabelecimento (mortalidade, competição com gramíneas, ataque de formigas, estresse hídrico) e depende fortemente de práticas de manejo, como controle de competidores e reposição de falhas (Mores, 2024). Ademais, o desempenho varia substancialmente entre espécies em função de atributos funcionais, arquitetura, taxas de crescimento e densidade básica da madeira, produzindo heterogeneidade no acúmulo de biomassa e carbono no curto prazo (Simovic, 2024). Assim, gerar informações por espécie é relevante para orientar decisões técnicas, como seleção de espécies, combinação de grupos sucessionais e estratégias de manutenção.

A estimativa de biomassa em restauração é frequentemente realizada por métodos indiretos, pois abordagens destrutivas são inviáveis em projetos que precisam manter os indivíduos no campo e acompanhar seu desenvolvimento. Nesse sentido, a aplicação de equações alométricas é uma prática consolidada,

desde que os modelos utilizados sejam apropriados ao tipo de floresta, ao contexto regional e à faixa etária do povoamento. Para restaurações jovens na Mata Atlântica, recomenda-se empregar equações calibradas para essas condições, além de padronizar medições dendrométricas e procedimentos de depuração de dados, sobretudo quando existem registros de indivíduos afetados por danos mecânicos ou manejo (por exemplo, roçadas) que alterem o padrão esperado de crescimento (Ferez et al., 2015).

Diante disso, este trabalho tem por objetivo quantificar o estoque e o incremento de biomassa e carbono em um plantio de restauração florestal de 4 anos (53 meses) na Mata Atlântica, descrevendo os valores de incremento de biomassa e carbono das espécies plantadas. Ao realizar esta pesquisa, o trabalho contribui com o conhecimento do estoque de carbono de espécies frequentemente utilizadas na restauração florestal da Mata Atlântica, tornando de conhecimento público informações que podem tornar sistemas de restauração com o objetivo de captura e sequestro de carbono mais eficientes.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 MUDANÇAS CLIMÁTICAS E MITIGAÇÃO

O aquecimento do sistema climático é um fenômeno amplamente documentado e associado, com alto grau de confiança, ao aumento das concentrações atmosféricas de gases de efeito estufa (GEE) decorrentes de atividades humanas, sobretudo pela queima de combustíveis fósseis, mudanças no uso da terra, processos industriais e agricultura (IPCC, 2021; IPCC, 2023). O dióxido de carbono (CO₂) é o principal GEE de longa permanência e, por isso, exerce papel central no forçamento radiativo de longo prazo. Além do CO₂, metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O) e gases industriais também contribuem para o aquecimento, com dinâmicas distintas de tempo de permanência e potencial de aquecimento, o que reforça a necessidade de abordagens setoriais complementares e integradas (Vendite et al., 2025).

Do ponto de vista conceitual, mitigação corresponde a intervenções humanas que reduzem as fontes de GEE ou aumentam os sumidouros capazes de removê-los da atmosfera, atuando sobre o balanço global de emissões e remoções (IPCC, 2022; IPCC, 2023). Assim, mitigação não se limita a “evitar desmatamento”, embora mudanças no uso e cobertura da terra sejam relevantes: envolve, simultaneamente, reduzir emissões em energia, transportes, indústria, agricultura e resíduos, além de ampliar remoções por ecossistemas e, em alguns casos, por tecnologias (IPCC, 2022).

No âmbito internacional, o Acordo de Paris estabelece uma orientação de longo prazo para a ação climática ao fixar metas de temperatura média global e ao estruturar compromissos nacionais por meio das Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs), com ciclos periódicos de atualização e aumento de ambição (UNFCCC, 2015). A literatura técnico-científica indica que alcançar tais objetivos demanda reduções substanciais e sustentadas de emissões, em especial de CO₂ associado ao uso de energia fóssil, ao mesmo tempo em que a integridade de sumidouros naturais é preservada e fortalecida (IPCC, 2022; IPCC, 2023). Em outras palavras, a mitigação efetiva depende de uma combinação entre descarbonização estrutural da economia e gestão qualificada do território.

Nesse cenário, as soluções baseadas na natureza, incluindo conservação, restauração e manejo sustentável de ecossistemas, são frequentemente destacadas

por sua capacidade de gerar co-benefícios, como proteção da biodiversidade, melhoria de serviços hidrológicos, redução de erosão e maior resiliência socioecológica (Vendite; Oliveira, 2025). Contudo, o próprio debate técnico ressalta que a contribuição climática de tais soluções é condicionada por fatores como a disponibilidade de área, o tempo de resposta dos ecossistemas, o risco de reversão (por fogo, seca, pragas ou manejo inadequado), além de questões de mensuração, reporte e verificação (MRV) (IPCC, 2022). Portanto, embora restauração e conservação possam desempenhar papel relevante, elas não substituem a necessidade de reduzir emissões nos setores de energia e indústria; em termos de prioridade, a mitigação requer reduzir emissões na fonte e, adicionalmente, ampliar remoções e estoques de carbono de forma robusta e monitorável (IPCC, 2022; IPCC, 2023).

A quantificação do papel das florestas na mitigação costuma considerar diferentes compartimentos de carbono, como biomassa acima do solo, raízes e carbono no solo. Em áreas em restauração, a acumulação de biomassa tende a ser mais rápida em fases iniciais, porém altamente variável de acordo com espécie, condições edafoclimáticas, histórico de uso do solo e práticas de condução. Isso reforça a importância de estimativas consistentes de biomassa e carbono por métodos indiretos, como equações alométricas adequadas à realidade de florestas jovens, além de protocolos de monitoramento que permitam comparabilidade temporal e espacial (IPCC, 2022; IPCC, 2023).

Dessa forma, ao tratar mudanças climáticas e mitigação no contexto da restauração florestal, é essencial combinar dois níveis de análise: **(i)** o quadro global, que exige reduções profundas de emissões e políticas intersetoriais; e **(ii)** o nível local e regional, onde projetos de restauração podem contribuir para a ampliação de sumidouros, desde que orientados por metas claras, boa seleção de espécies, manejo adequado e monitoramento de desempenho em biomassa e carbono. Essa abordagem integrada é particularmente relevante em biomas altamente fragmentados, como a Mata Atlântica, nos quais a restauração pode articular ganhos climáticos e ecológicos de forma sinérgica.

2.2 MATA ATLÂNTICA: FRAGMENTAÇÃO, REMANESCENTES E RESTAURAÇÃO

A Mata Atlântica é um dos biomas mais relevantes do Brasil sob múltiplas

perspectivas (ecológica, social e econômica) por concentrar elevada biodiversidade, endemismos e uma longa história de ocupação humana, com intensa conversão de habitats ao longo do tempo. O processo histórico de expansão urbana, industrial e agropecuária resultou em uma paisagem altamente antropizada, marcada por perda de cobertura florestal, isolamento de remanescentes e forte influência de borda, o que reduz a integridade ecológica, compromete fluxos gênicos e torna populações mais vulneráveis a extinções locais (Ribeiro et al., 2009). Em termos de estrutura espacial, os remanescentes tendem a se apresentar como mosaicos de fragmentos pequenos e desconectados, frequentemente inseridos em matrizes agrícolas ou urbanas, elevando a pressão antrópica e dificultando a manutenção de processos ecológicos essenciais (Ribeiro et al., 2009).

A fragmentação tem implicações diretas para a conservação e para o funcionamento ecossistêmico. Fragmentos menores e mais isolados costumam apresentar maior proporção de borda e menor área de interior, o que altera microclima (temperatura, umidade, vento), aumenta a suscetibilidade a incêndios e invasões biológicas e modifica a composição e a dinâmica da vegetação. Esses efeitos repercutem na capacidade do ecossistema de sustentar biodiversidade e também influenciam o acúmulo de biomassa e carbono, uma vez que mudanças na estrutura florestal e na mortalidade de árvores podem afetar estoques e incrementos ao longo do tempo (IPCC, 2022). Assim, a conservação dos remanescentes existentes e a recomposição de conectividade por restauração são medidas complementares e estratégicas em paisagens fragmentadas.

A discussão sobre “quanto resta” de Mata Atlântica varia conforme critérios e escalas de mapeamento, mas trabalhos de referência apontam valores aproximados entre 11% e 16% de cobertura florestal, ressaltando, sobretudo, a distribuição desigual e altamente fragmentada da vegetação remanescente (Ribeiro et al., 2009). Relatórios de monitoramento recentes também destacam que uma fração relativamente pequena corresponde a florestas mais maduras dentro do recorte legal do bioma, reforçando a importância de combinar proteção de remanescentes com ações de restauração capazes de recompor estrutura e funções ecológicas ao longo do tempo (Fundação SOS Mata Atlântica; INPE, 2025). Esse cenário torna a restauração particularmente relevante não apenas como instrumento de recomposição florestal, mas como ferramenta para reduzir isolamento funcional, criar áreas de amortecimento, favorecer a dispersão de sementes e ampliar a

resiliência da paisagem.

No Brasil, a proteção e a recuperação da Mata Atlântica se estruturam em marcos legais e políticas públicas. A Lei da Mata Atlântica estabelece diretrizes específicas para o uso e a proteção da vegetação nativa do bioma, contribuindo para organizar instrumentos de controle e conservação (Brasil, 2006). Além disso, o Código Florestal estabelece obrigações relacionadas à recomposição de Áreas de Preservação Permanente e Reserva Legal, funcionando como um dos principais vetores institucionais para restauração e regularização ambiental em propriedades rurais (Brasil, 2012). Somam-se a esses instrumentos políticas como o Plano Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa (PLANAVEG), que busca articular diretrizes, instrumentos econômicos e mecanismos de implementação e monitoramento voltados à ampliação da restauração e recomposição de vegetação nativa (Brasil, 2017).

Do ponto de vista conceitual e técnico, é importante diferenciar “restauração” de usos genéricos do termo “recuperação”. A restauração ecológica pressupõe metas explícitas associadas à retomada de trajetórias ecológicas, incluindo atributos estruturais (como estratificação, densidade, fechamento de dossel) e funcionais (como ciclagem de nutrientes, provisão de habitat, regulação hídrica), sendo, portanto, inadequado tratá-la como uma ação simples, automática ou garantida apenas pelo plantio (Gann et al., 2019). Em áreas de Mata Atlântica, essa complexidade se manifesta, por exemplo, na necessidade de compatibilizar objetivos ecológicos com restrições de paisagem (alta fragmentação), limitações edáficas e legados de uso do solo (compactação, empobrecimento, bancos de sementes alterados), além de pressões recorrentes como competição com gramíneas e danos por manejo (roçadas), que podem comprometer a trajetória de crescimento de indivíduos e alterar estimativas de biomassa e carbono se não forem devidamente controlados e registrados.

A restauração em paisagens de Mata Atlântica também pode gerar benefícios climáticos, sobretudo pela ampliação de estoques de carbono na biomassa ao longo do tempo, mas esses ganhos dependem do sucesso do estabelecimento, da condução e das condições locais. Por essa razão, a produção de evidências quantitativas sobre desempenho de espécies e de sistemas restaurados, especialmente nos primeiros anos, é decisiva para orientar decisões técnicas. Em plantios jovens, diferenças entre espécies quanto a taxa de crescimento, arquitetura

e densidade da madeira podem gerar grande heterogeneidade em biomassa e carbono no curto prazo, com implicações diretas para a seleção de espécies, arranjos de plantio e estratégias de manutenção. Além disso, a credibilidade de resultados e comparações entre áreas depende de monitoramento e padronização metodológica, incluindo escolha de equações alométricas apropriadas ao contexto e procedimentos claros de depuração de dados quando houver indivíduos danificados ou medidas inconsistentes (Ferez et al., 2015).

Dessa forma, considerando a elevada fragmentação da Mata Atlântica, a restrição de remanescentes mais conservados e a necessidade de ampliar áreas restauradas com qualidade ecológica, torna-se fundamental integrar conservação e restauração com monitoramento robusto. A quantificação de biomassa e carbono por espécie e em escala de área contribui para qualificar projetos de restauração, subsidiar escolhas de espécies e fortalecer a avaliação de resultados, alinhando metas ecológicas e climáticas em um bioma historicamente pressionado e socialmente estratégico.

2.3 BIOMASSA FLORESTAL E CARBONO

A biomassa florestal representa a massa de matéria orgânica acumulada nos diferentes compartimentos de um ecossistema, sendo comumente organizada em biomassa acima do solo (fuste, galhos e folhas), biomassa abaixo do solo (raízes) e, em avaliações mais abrangentes, em compartimentos adicionais como serapilheira e madeira morta. Do ponto de vista climático, a biomassa é relevante por constituir um dos principais reservatórios de carbono nos ecossistemas terrestres, funcionando como estoque dinâmico que varia ao longo do tempo em resposta ao crescimento, mortalidade, distúrbios e manejo (IPCC, 2006; Pan et al., 2011). Assim, quantificar biomassa e carbono é essencial para entender a contribuição de florestas (naturais, secundárias e restauradas) na mitigação das mudanças climáticas, bem como para comparar desempenhos entre áreas e estratégias de restauração (IPCC, 2022; IPCC, 2023).

O carbono na biomassa florestal integra o ciclo global do carbono, no qual fluxos de assimilação de CO₂ (fotossíntese) e liberação (respiração, decomposição e combustão) determinam o balanço líquido do ecossistema. Em termos práticos, um aumento do estoque de biomassa ao longo do tempo indica sequestro e

armazenamento de carbono, desde que não haja perdas equivalentes por mortalidade, distúrbios ou exportação de material orgânico. Em escala global, florestas têm sido descritas como importantes sumidouros de carbono, embora sua contribuição dependa de processos ecológicos, mudanças no uso da terra e regimes de distúrbio (Pan et al., 2011). Em paisagens restauradas, especialmente em estágios iniciais, o acúmulo de biomassa tende a ser mais rápido do que em florestas maduras, porém apresenta grande variabilidade em função das condições locais e da composição de espécies (Chazdon, 2014; Poorter et al., 2016).

Em áreas em restauração, o acúmulo de biomassa e carbono é influenciado por múltiplos fatores: clima (precipitação e déficit hídrico), fertilidade e profundidade do solo, histórico de uso (compactação, erosão, presença de gramíneas), pressão de herbivoria e formigas, e práticas de condução (controle de competidores, reposição de falhas e proteção contra danos mecânicos). Além disso, diferenças interespecíficas são determinantes: espécies com maior taxa de crescimento, estratégias aquisitivas e arquitetura favorável podem acumular biomassa rapidamente nos primeiros anos, enquanto espécies de crescimento mais lento podem contribuir de forma mais expressiva em horizontes temporais maiores e em atributos ecológicos (por exemplo, diversidade estrutural e estabilidade do sistema) (Chazdon, 2014; Poorter et al., 2016). Portanto, a avaliação por espécie e por compartimentos é uma abordagem recomendável para compreender padrões de incremento e subsidiar decisões de composição de plantios.

A quantificação de biomassa florestal pode ser realizada por métodos destrutivos (corte e pesagem) ou, mais frequentemente, por métodos indiretos. Em projetos de restauração, métodos destrutivos são geralmente inviáveis por comprometerem o objetivo do plantio e por demandarem esforço logístico elevado. Assim, a abordagem mais comum consiste em estimar biomassa por equações alométricas, que relacionam variáveis dendrométricas (diâmetro e altura) e atributos funcionais (como densidade básica da madeira) com a biomassa do indivíduo (Brown, 1997; Chave et al., 2014). A robustez dessas estimativas depende diretamente da adequação do modelo ao tipo de vegetação, ao contexto ambiental e à faixa de tamanho/idade avaliada, pois equações desenvolvidas para florestas maduras ou para outras regiões podem introduzir vieses quando aplicadas a plantios jovens (Chave et al., 2014).

A densidade básica da madeira é particularmente importante porque incorpora

diferenças estruturais entre espécies e influencia a relação entre dimensões do tronco e massa de biomassa. Modelos alométricos que incluem densidade e altura, quando disponíveis, tendem a reduzir incertezas em comparação a modelos baseados apenas em diâmetro, especialmente em florestas tropicais com grande diversidade de formas e estratégias de crescimento (Chave et al., 2014). Ainda assim, a mensuração de altura pode aumentar a variabilidade observacional em campo, exigindo padronização de procedimentos e controle de qualidade. Em restauração, além disso, indivíduos podem apresentar deformações, múltiplos fustes ou danos por manejo (por exemplo, roçadas), o que afeta a arquitetura e pode alterar a interpretação de “crescimento” se o histórico de dano não for registrado e considerado na triagem de dados.

A conversão de biomassa para carbono é frequentemente feita por um fator de fração de carbono (*carbon fraction*), isto é, a proporção de carbono contida na massa seca da biomassa. Diretrizes metodológicas amplamente utilizadas adotam valores padrão quando não há mensuração laboratorial específica, reconhecendo que a fração de carbono pode variar entre tecidos e espécies (IPCC, 2006). Em estudos aplicados, essa etapa deve ser explicitada com clareza (fator utilizado, justificativa e fonte), pois impacta diretamente os estoques e incrementos estimados. De modo complementar, avaliações mais abrangentes de carbono podem incluir carbono no solo, frequentemente o maior reservatório em muitos ecossistemas, porém com dinâmica e resposta temporal distintas em relação à biomassa acima do solo. Ainda que este trabalho foque biomassa e carbono na biomassa arbórea, é relevante reconhecer que, em restauração, os ganhos climáticos podem envolver múltiplos compartimentos, com tempos de resposta diferentes (IPCC, 2006; IPCC, 2022).

Por fim, a interpretação de biomassa e carbono em restauração deve considerar que os estoques são resultados acumulados, enquanto o incremento reflete a taxa de mudança ao longo do tempo. Em fases iniciais, os incrementos podem ser elevados, mas instáveis devido a mortalidade, competição e eventos de manejo ou distúrbio. Portanto, séries temporais de monitoramento, avaliações por espécie e por compartimentos, e uso de equações alométricas apropriadas ao contexto são fundamentais para gerar evidências comparáveis e úteis à tomada de decisão em restauração, especialmente quando se busca aliar objetivos ecológicos e climáticos (Chazdon, 2014; Poorter et al., 2016; IPCC, 2022).

2.4 EQUAÇÕES ALOMÉTRICAS PARA ESTIMATIVA DE BIOMASSA EM RESTAURAÇÃO

A estimativa de biomassa florestal é um componente central em estudos de carbono, pois a biomassa da vegetação representa um dos principais reservatórios de carbono em ecossistemas terrestres. Em projetos de restauração, a mensuração direta por métodos destrutivos (corte, secagem e pesagem) é, em geral, inviável por razões operacionais, éticas e econômicas, além de contrariar o objetivo de manter e acompanhar o desenvolvimento do plantio. Por essa razão, a abordagem mais utilizada é a estimativa indireta por equações alométricas, que relacionam atributos mensuráveis das árvores (como diâmetro e altura) à biomassa (Brown, 1997; Chave et al., 2014).

As equações alométricas baseiam-se no princípio de que dimensões do indivíduo e características funcionais (por exemplo, densidade básica da madeira) guardam relação sistemática com a massa de biomassa acumulada. Em termos práticos, são modelos estatísticos derivados de amostras em que árvores foram medidas e, em algum momento, tiveram sua biomassa determinada por procedimentos de referência (comumente destrutivos), permitindo ajustar relações aplicáveis a árvores de mesma região, tipo de vegetação e faixa de tamanho. A utilidade dessas equações em restauração depende diretamente do seu domínio de validade: aplicar uma equação fora do contexto para o qual foi calibrada (por exemplo, usar modelo de floresta madura em plantios jovens) pode introduzir vieses relevantes nas estimativas de biomassa e carbono (Chave et al., 2014; IPCC, 2006).

Em florestas tropicais, modelos amplamente utilizados incorporam, além do diâmetro, a altura total e a densidade da madeira, pois esses termos reduzem incertezas associadas à variabilidade de forma e arquitetura entre espécies e ambientes (Chave et al., 2014). A densidade básica da madeira é particularmente importante em plantios mistos, como os de restauração, nos quais convivem espécies com estratégias de crescimento contrastantes. Quando não se dispõe de mensuração local, a densidade pode ser obtida a partir de bases de dados consolidadas, reconhecendo-se que variações intraespecíficas e regionais podem influenciar as estimativas (Zanne et al., 2009; Chave et al., 2014). Assim, boas práticas recomendam explicitar a fonte da densidade, priorizar valores específicos por espécie e, quando necessário, justificar aproximações (por gênero, família ou

média regional).

Do ponto de vista matemático, muitos modelos alométricos são expressos como funções potência (por exemplo, $Biomassa = a \times D^b$), que frequentemente são ajustadas na forma linearizada por logaritmos (ln), resultando em modelos do tipo $\ln(Biomassa) = \alpha + \beta \ln(D) + \dots$. Essa forma é estatisticamente conveniente, porém impõe cuidados na interpretação e na conversão de volta para a escala original. Ao retransformar valores previstos de $\ln(Biomassa)$ para Biomassa, ocorre um viés devido à natureza lognormal dos resíduos, o que pode subestimar a biomassa se não houver correção adequada. Estudos clássicos recomendam o uso de fatores de correção ou estimadores específicos (por exemplo, fator baseado na variância residual, “*smearing*” ou correções equivalentes), e esse procedimento deve ser descrito no método sempre que modelos log-transformados forem empregados (Baskerville, 1972; Sprugel, 1983).

Em restaurações, a padronização das variáveis dendrométricas é um ponto crítico. Frequentemente usa-se o diâmetro à altura do peito (DAP, 1,30 m), mas em plantios jovens ou em indivíduos com bifurcação baixa e múltiplos fustes, pode-se adotar o diâmetro a 30 cm do solo (D30) ou outra referência operacional. Nessas situações, é essencial compatibilizar a variável medida com a variável exigida pelo modelo alométrico adotado. Para árvores com múltiplos fustes, uma prática tecnicamente consistente é converter cada fuste em área seccional (ou área basal na altura de referência) e somar as áreas, obtendo uma variável equivalente de seção transversal total, que pode ser utilizada em modelos que trabalham com área seccional ou em conversões para um “diâmetro equivalente” (Chave et al., 2014). Independentemente da estratégia, deve-se evitar confusão conceitual entre diâmetro (cm) e área seccional (cm²), deixando explícitas as unidades e a forma de cálculo.

Outro aspecto relevante é que a biomassa pode ser estimada para diferentes compartimentos: componente lenhoso acima do solo (fuste e ramos), copa (folhas e ramos finos) e raízes. Em muitos protocolos e inventários, a “biomassa acima do solo” pode ser reportada apenas para o componente lenhoso ou como soma de compartimentos; por isso, recomenda-se declarar com precisão o que está sendo estimado e como os compartimentos foram combinados. Quando o objetivo é obter biomassa total, podem ser utilizados modelos específicos para raízes e copa ou relações alométricas secundárias que derivam desses compartimentos a partir de uma biomassa acima do solo previamente estimada, com as devidas ressalvas de

incerteza (IPCC, 2006). Em restaurações jovens, em particular, a proporção entre compartimentos pode variar ao longo do tempo e entre espécies, de modo que o uso de equações complementares deve ser justificado pela compatibilidade com a população amostrada.

Para o contexto de restauração na Mata Atlântica, um ponto metodológico importante é priorizar equações calibradas para condições regionais e para o estágio de desenvolvimento do plantio. Modelos ajustados especificamente para plantios e florestas jovens tendem a representar melhor a arquitetura e a relação diâmetro–altura típica desses sistemas quando comparados a modelos generalistas de florestas maduras. Nesse sentido, estudos que desenvolveram equações em restaurações no bioma fornecem base metodológica mais aderente e reduzem o risco de extrapolações indevidas (Ferez et al., 2015). Ainda assim, boas práticas recomendam sempre reportar limitações, faixa de diâmetros/alturas coberta pelo modelo, e conduzir verificações de consistência (por exemplo, inspeção de outliers e análise de sensibilidade à densidade da madeira e à altura).

Por fim, a estimativa de biomassa por equações alométricas deve ser interpretada como uma medida com incertezas associadas, dependente da qualidade da medição em campo, da adequação do modelo, da representatividade das espécies e do tratamento de dados inconsistentes (por exemplo, indivíduos com danos severos por manejo). Em estudos aplicados à mitigação e monitoramento de restauração, a transparência metodológica é decisiva para permitir comparabilidade e reprodutibilidade. Portanto, descrever claramente a equação utilizada, as variáveis de entrada, a fonte de densidade da madeira, o procedimento de retransformação (quando houver \ln) e os critérios de depuração fortalecem a robustez científica das estimativas de biomassa e carbono em projetos de restauração.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Quantificar o estoque e o incremento anual, gerais e por espécie, de biomassa e carbono de plantio de restauração florestal na Mata Atlântica.

3.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a)** Determinar o estoque e o incremento anual de biomassa e carbono de plantio de restauração florestal na Mata Atlântica;
- b)** Determinar o estoque e o incremento anual de biomassa e de carbono de 24 espécies arbóreas utilizadas na restauração da Mata Atlântica, por meio de equações alométricas;
- c)** Avaliar se há diferença de biomassa e de carbono entre as diferentes espécies plantadas.

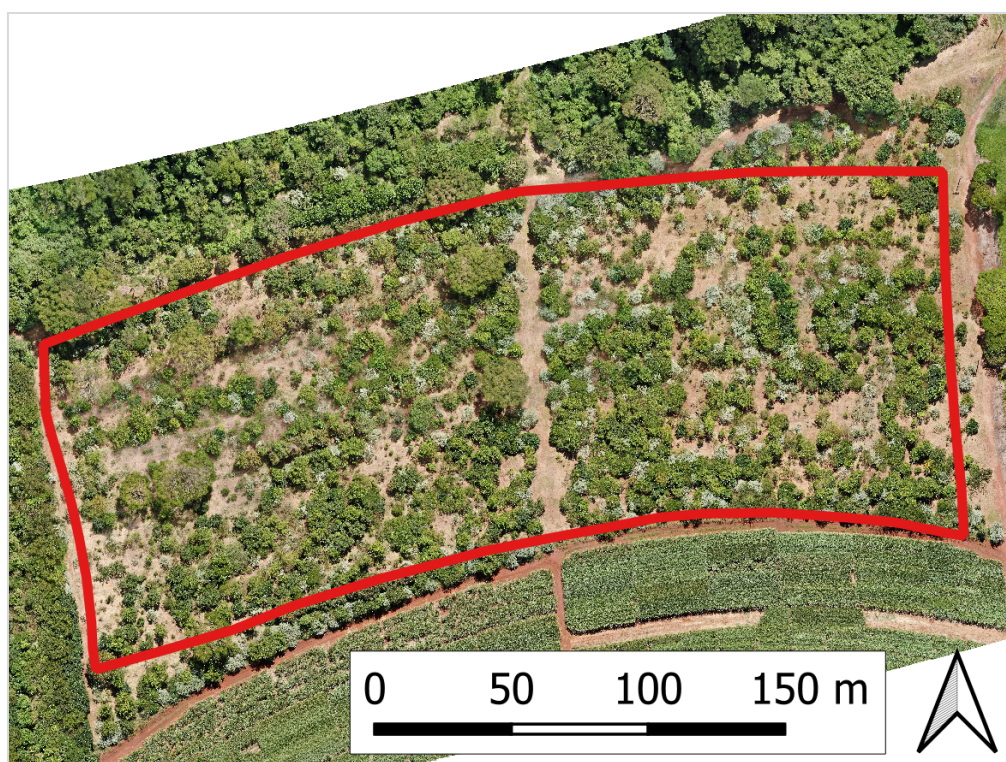
4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A coleta de dados foi realizada no município de Araras (SP), especificamente na área de restauração florestal experimental do Centro de Ciências Agrárias (CCA) da Universidade Federal de São Carlos, *campus* Araras (UFSCar, 22°18'35" S e 47°23'17" O) (Figura 1). O local possui como vegetação natural a Floresta Estacional Semidecidual, que foi desmatada e utilizada para atividades agrícolas, tendo sido cultivado cana-de-açúcar na última década e soja a partir de 2018, antes de ter o experimento implantado em 2021 (Chiarotto, 2023).

O local possui, no total, uma área de 1.296 m², totalizando 3,11 ha (Chiarotto, 2023), apresenta altitude média de 670 m e solo classificado como Nitossolo Vermelho Distroférico latossólico (NVdf), com textura muito argilosa (Lima; Oliveira, 2024). O clima é do tipo Cwa (Köppen, 1948), caracterizado por verões quentes e úmidos e invernos secos, com temperatura média anual de 21,4°C e precipitação média anual de 1.441 mm.

Figura 1. Área da coleta de dados no CCA-UFSCar, Araras-SP, destacado em vermelho.



Fonte: Elaborado pela autora no software QGIS (2025).

Para implantação da área experimental em fevereiro de 2021, houve preparo do solo com roçagem mecânica para eliminação de gramíneas e plantas infestantes, seguida de gradagem e sulcagem. Uma semana após a implantação, foram realizadas irrigações periódicas com cerca de 5 L de água por muda, que foi finalizada em novembro de 2021 (Chiarotto, 2023).

No ano de implantação, o controle de gramíneas da área experimental foi realizado periodicamente com roçagem e uso do herbicida glifosato, aplicado de forma direcionada às plantas daninhas. Houve também controle de formigas cortadeiras com isca à base de sulfluramida de forma periódica (Chiarotto, 2023). Depois do primeiro ano de implantação, o controle de plantas daninhas passou a ser ao menos uma vez por ano, de forma mecanizada.

4.2 ESPÉCIES AVALIADAS

As espécies consideradas neste estudo são as implantadas por Chiarotto (2023) em fevereiro de 2021 (Tabela 1), possuindo então 24 espécies de árvores nativas da Mata Atlântica, pertencentes à 15 famílias, sendo 11 espécies pioneiras e 13 não pioneiras.

Tabela 1. Espécies implantadas na área de restauração florestal experimental no CCA-UFSCar, Araras-SP, e número de indivíduos que atenderam ao critério de inclusão (altura \geq 30 cm e D30 $>$ 2 cm).

Famílias	Espécies	Nome comum	Nº
Anacardiaceae	<i>Astronium graveolens</i> Jacq.	guaritá	171
Apocynaceae	<i>Tabernaemontana hystrix</i> Steud.	leiteiro	119
Bignoniaceae	<i>Handroanthus chrysotrichus</i> (Mart. ex DC) Mattos	ipê-roxo-sete-folhas	136
	<i>Handroanthus heptaphyllus</i> (Vell.) Mattos	ipê-amarelo-cascudo	141
Boraginaceae	<i>Cordia trichotoma</i> (Vell.) Arráb. ex Steud.	louro-pardo	196
Fabaceae	<i>Enterolobium contortisiliquum</i> (Vell.) Morong	timburi	114
	<i>Inga vera</i> subsp. <i>affinis</i> (DC.) T.D.Penn.	ingá-do-brejo	143
	<i>Inga marginata</i> Willd.	ingá-feijão	136

Famílias	Espécies	Nome comum	Nº
	<i>Parapiptadenia rigida</i> (Benth.) Brenan	guarucuia	177
	<i>Senna multijuga</i> (Rich.) H.S.Irwin & Barneby	pau-cigarra	132
Lamiaceae	<i>Aegiphila integrifolia</i> (Jacq.) Moldenke	tamanqueira	46
Lecythidaceae	<i>Cariniana legalis</i> (Mart.) Kuntze	jequitibá-rosa	32
	<i>Cariniana estrellensis</i> (Raddi) Kuntze	jequitibá-branco	40
Malvaceae	<i>Ceiba speciosa</i> (A. St.-Hil.) Ravenna	paineira-rosa	119
	<i>Guazuma ulmifolia</i> Lam.	mutambo	218
	<i>Heliocarpus popayanensis</i> Kunth	algodoeiro	135
Meliaceae	<i>Cedrela fissilis</i> Vell.	cedro	78
Myrtaceae	<i>Eugenia uniflora</i> L.	pitanga	50
	<i>Psidium cattleianum</i> Sabine	aracá-amarelo	102
Primulaceae	<i>Myrsine coriacea</i> (Sw.) R.Br. ex Roem. & Schult.	capororoca	21
Rubiaceae	<i>Genipa americana</i> L.	jenipapo	77
Rutaceae	<i>Esenbeckia leiocarpa</i> Engl.	guarantã	5
Solanaceae	<i>Solanum granulosoleprosum</i> Dunal	fumo-bravo	228
Verbenaceae	<i>Citharexylum myrianthum</i> Cham.	pau-viola	204
Total			2820

Fonte: elaborado pela autora (2025).

Das espécies listadas, *Guazuma ulmifolia*, *Aegiphila integrifolia*, *Heliocarpus popayanensis*, *Senna multijuga*, *Inga vera* subsp. *affinis*, *Inga marginata*, *Solanum granulosoleprosum*, *Psidium cattleianum*, *Enterolobium contorsiliquum*, e *Myrsine coriacea* são classificadas como pioneiras (Chiarotto, 2023), ou seja, exigem muita luz durante toda a vida, tem crescimento inicial muito rápido e um período curto de vida (4 à 30 anos), além de formam bancos de sementes (Embrapa, 2006).

As espécies não pioneiras são *Astronium graveolens*, *Handroanthus chrysotrichus*, *Handroanthus heptaphyllus*, *Cordia trichotoma*, *Parapiptadenia rigida*, *Cariniana legalis*, *Cariniana estrellensis*, *Cedrela fissilis*, *Ceiba speciosa*, *Genipa americana*, *Tabernaemontana hystrix*, *Eugenia uniflora*, *Esenbeckia leiocarpa* e *Citharexylum myrianthum* (Chiarotto, 2023), com algumas sendo classificadas como secundárias tardias, tolerantes à sombra por muitos anos no início da vida, de

crescimento lento ou moderado, vida longa e formando banco de plântulas (Embrapa, 2006), e outras como clímax, sendo estas tolerantes à sombra forte por muitos anos e por isso podendo ficar no sub-bosque durante toda a vida, de crescimento lento, vida moderada ou longa e formando banco de plântulas (Embrapa, 2006).

4.3 COLETA DE DADOS DENDROMÉTRICOS E CRITÉRIOS DE INCLUSÃO

A coleta de dados ocorreu entre maio e agosto de 2025, quatro anos após a implantação, quando o plantio apresentava 53 meses de idade. Em toda a área do experimento foram mensurados, para os indivíduos das 24 espécies, (i) o diâmetro do caule a 30 cm do solo (D30) e (ii) a altura total dos indivíduos vivos. Foram considerados mortos os indivíduos que apresentavam desfolha e caule seco abaixo da casca.

A altura foi mensurada com canos graduados de 4,8 m (Figura 2a), tomando-se como referência a distância do nível do solo até a inserção da última folha do caule (Figura 2b). Para árvores com mais de um fuste, adotou-se o maior fuste para a medida de altura. Nos casos de indivíduos inclinados, como a *Parapiptadenia rigida*, a medição foi realizada acompanhando a inclinação do caule; quando havia mais de um fuste, considerou-se também o maior.

Figura 2. a) Canos utilizados para medição de altura;
b) Medição de altura.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

O D30 foi mensurado com paquímetro digital, suta ou fita métrica (Figura 3a), sendo estas duas últimas empregadas quando o diâmetro ultrapassava 15 cm. As medições foram realizadas perpendicularmente ao nível do solo (Figura 3b). Para

indivíduos em que os dados coletados foram em circunferência (C30) devido ao uso da fita métrica, realizou-se a conversão para diâmetro pela relação:

$$D30 = \frac{C30}{\pi} \quad (1)$$

Figura 3. a) Paquímetro, SUTA e fitas métricas;
b) Medição de diâmetro à 30 cm do solo.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Posteriormente, os diâmetros foram convertidos para área basal a 30 cm do solo (AB_{D30}), assumindo a seção circular do tronco. Para indivíduos com múltiplos fustes, todos os fustes foram medidos e convertidos à diâmetro único pela relação:

$$D30 \text{ único} = \left(\frac{\sum AB_{D30} * 4}{\pi} \right)^{0,5} \quad (2)$$

A área basal total foi calculada pela relação:

$$AB = (\pi * \left(\frac{D30 \text{ único}}{1000} \right)^2) / 4 \quad (3)$$

Para a estimativa de biomassa e carbono, foram incluídos apenas indivíduos com altura ≥ 30 cm e $D30 > 2$ cm, conforme recomendado para aplicação das equações utilizadas (Ferez et al., 2015). No total, foram avaliados 5.184 indivíduos, dos quais 3.011 estavam vivos no momento da coleta e 2.820 atenderam aos critérios de inclusão. O número de indivíduos por espécie incluídos nas estimativas variou de 5 (*Esenbeckia leiocarpa*) a 228 (*Solanum granulosoleprosum*) (Tabela 1).

4.4 ESTIMATIVA DE BIOMASSA E CARBONO

A biomassa de cada indivíduo foi estimada pela soma da biomassa dos compartimentos arbóreos: biomassa lenhosa acima do solo (BLAS) (eq. 4), biomassa de raízes grossas (BR) (eq. 5) e biomassa da copa (BC) (eq. 6), conforme as equações alométricas propostas por Ferez *et al.* (2015), que utilizam como variáveis de entrada: área basal a 30 cm do solo (AB, em m^2), altura (H, em m) e densidade básica da madeira (ρ , em $g.cm^{-3}$).

A densidade da madeira da maior parte das espécies foi obtida do conjunto de dados disponibilizado pela DRYAD (Zanne, 2009), enquanto a da *Citharexylum myrianthum* foi obtida do banco de dados disponibilizado pela Wood Density dataset (Oliveira, 2019). Como não havia densidade específica para *Tabernaemontana hystrix* nas bases consultadas, adotou-se o valor de densidade de *Tabernaemontana catharinensis* disponível no banco de dados da Wood Density dataset.

As equações utilizadas foram (Ferez et al., 2015):

$$\ln(BLAS) = 6,039 + 0,945 \cdot \ln(AB) + 0,961 \cdot \ln(H) + 1,022 \cdot \ln(\rho) \quad (4)$$

$$\ln(BR) = -0,288 + 0,742 \cdot \ln(BLAS) \quad (5)$$

$$BC = 0,384 + 0,123 \cdot BLAS - 0,086 \cdot BR \quad (6)$$

$$Biomassa\ Total = BLAS + BR + BC \quad (7)$$

Como as equações 4 e 5 estão expressas no domínio logarítmico, a obtenção de BLAS e BR foi realizada por retrotransformação exponencial após o cálculo dos respectivos valores de \ln , mantendo-se BC e a soma final conforme as expressões acima. Os resultados de biomassa foram expressos em kg por indivíduo.

O estoque de carbono por indivíduo foi obtido ao multiplicar o valor da Biomassa Total por 0,5 (eq. 8), adotando-se o pressuposto operacional de que

aproximadamente 50% da biomassa corresponde a carbono, e expresso em kg por planta.

$$\text{Carbono} = \text{Biomassa Total} \cdot 0,5 \quad (8)$$

O incremento anual de biomassa e carbono foi estimado a partir dos estoques calculado nas equações 7 e 8, dividindo-os por 53 meses (idade do plantio) e multiplicando-o por 12, obtendo-se o incremento anual ($\text{kg} \cdot \text{ano}^{-1}$) (eq. 9 e 10). Para a área, aplicou-se o mesmo procedimento após a padronização por hectare.

$$\text{Incremento de biomassa} = \left(\frac{\text{Biomassa Total}}{53} \right) * 12 \quad (9)$$

$$\text{Incremento de carbono} = \left(\frac{\text{Carbono}}{53} \right) * 12 \quad (10)$$

4.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

As estatísticas descritivas por espécie foram calculadas no software R (versão 4.5.2), adotando-se medianas para Biomassa Total, Estoque de Carbono e Incremento Anual de Carbono por espécie. A normalidade dos dados foi verificada pelo teste de Shapiro–Wilk e a homogeneidade de variâncias pelo teste de Bartlett. Como os pressupostos de normalidade e homocedasticidade não foram atendidos, utilizou-se o teste não paramétrico de Kruskal–Wallis para comparação entre espécies, seguido do teste de Dunn com ajuste de significância pelo método Bonferroni. Adotou-se um nível de significância de 5% ($p < 0,05$). As diferenças entre espécies foram representadas por gráficos do tipo boxplot, construídos com o pacote ggplot2.

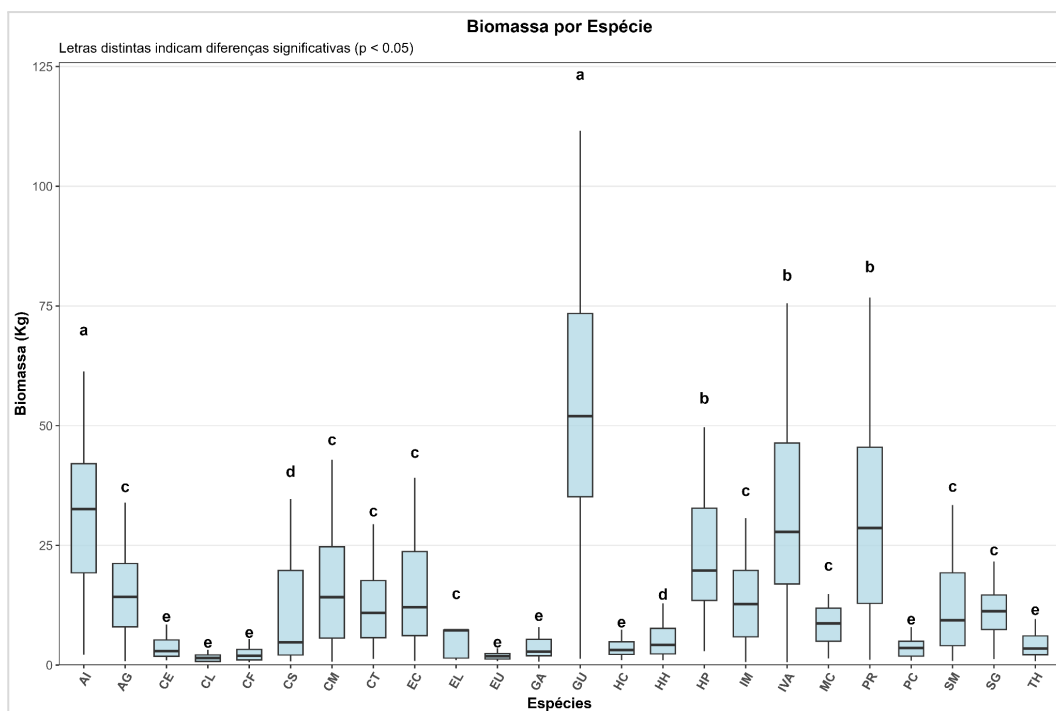
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Aos 53 meses após a implantação, o plantio de restauração apresentou estoque de biomassa de 51,3 Mg.ha⁻¹ e estoque de carbono de 25,6 Mg.ha⁻¹. Considerando a idade do plantio (53 meses = 4,4 anos), esses valores correspondem a um incremento médio anual de aproximadamente 11,6 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹, para biomassa, e 5,8 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹, para carbono. Esse desempenho evidencia a contribuição de plantios jovens para o acúmulo de biomassa e carbono no curto prazo, especialmente quando há estabelecimento adequado, manutenção inicial e bom desempenho das espécies mais responsivas ao ambiente local (Poorter et al., 2016; IPCC, 2022).

O plantio de restauração apresentou alta heterogeneidade nos valores de biomassa e carbono por indivíduo, variando de 0,61 a 200,74 kg de biomassa por árvore e 0,30 a 100,37 Kg de carbono por árvore. Para o incremento anual de biomassa, houve variação de 0,15 a 1,43 kg para *Cariniana legalis* e 0,30 a 45,45 kg para *Guazuma ulmifolia*. De acordo com Chazdon (2014) e Poorter *et al.* (2016), essa amplitude indica forte variabilidade intraespecífica e interespecífica, típica de restaurações em fase inicial, nas quais diferenças de microambiente, competição, histórico de manejo, arquitetura e crescimento individual podem resultar em distribuição assimétrica de tamanhos e, conseqüentemente, de biomassa e carbono.

Quando comparamos os valores das medianas de biomassa e carbono entre espécies (Figuras 4 e 5) continuamos a observar uma alta variabilidade, indo de 1,47 kg de biomassa e 0,74 kg de carbono para *Cariniana legalis* até 52,69 kg de biomassa e 26,35 kg de carbono para *Guazuma ulmifolia* (Tabela 2). Isso ocorre devido aos traços funcionais (altura, diâmetro, densidade da madeira, etc) de cada espécie, que, de acordo com Santos *et al.* (2025), têm um grande papel na variação de estoque de carbono das espécies, pois influenciam sua capacidade de armazená-lo e absorvê-lo.

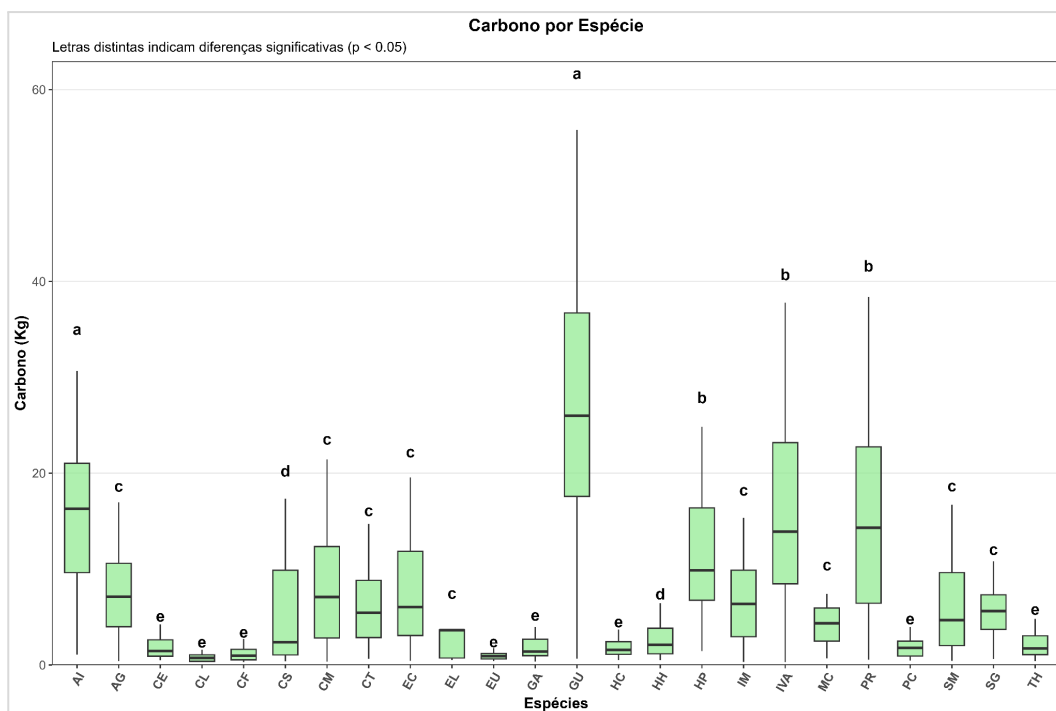
Figura 4. Biomassa por espécie*.



Fonte: Elaborado pela autora no software R (2025).

***Legenda:** AI - *Aegiphila integrifolia*, AG - *Astronium graveolens*, CE - *Cariniana estrellensis*, CL - *Cariniana legalis*, CF - *Cedrela fissilis*, CS - *Ceiba speciosa*, CM - *Citharexylum myrianthum*, CT - *Cordia trichotoma*, EC - *Enterolobium contortisiliquum*, EL - *Esenbeckia leiocarpa*, EU - *Eugenia uniflora*, GA - *Genipa americana*, GU - *Guazuma ulmifolia*, HC - *Handroanthus chrysotrichus*, HH - *Handroanthus heptaphyllus*, HP - *Heliocarpus popayanensis*, IM - *Inga marginata*, IVA - *Inga vera* subsp. *affinis*, MC - *Myrsine coriacea*, PR - *Parapiptadenia rigida*, PC - *Psidium cattleyanum*, SM - *Senna multijuga*, SG - *Solanum granuloseprosum* e TH - *Tabernaemontana hystrix*.

Figura 5. Carbono por espécie*.



Fonte: Elaborado pela autora no software R (2025).

***Legenda:** AI - *Aegiphila integrifolia*, AG - *Astronium graveolens*, CE - *Cariniana estrellensis*, CL - *Cariniana legalis*, CF - *Cedrela fissilis*, CS - *Ceiba speciosa*, CM - *Citharexylum myrianthum*, CT - *Cordia trichotoma*, EC - *Enterolobium contortisiliquum*, EL - *Esenbeckia leiocarpa*, EU - *Eugenia uniflora*, GA - *Genipa americana*, GU - *Guazuma ulmifolia*, HC - *Handroanthus chrysotrichus*, HH - *Handroanthus heptaphyllus*, HP - *Heliocarpus popayanensis*, IM - *Inga marginata*, IVA - *Inga vera* subsp. *affinis*, MC - *Myrsine coriacea*, PR - *Parapiptadenia rigida*, PC - *Psidium cattleyanum*, SM - *Senna multijuga*, SG - *Solanum granuloseprosum* e TH - *Tabernaemontana hystrix*.

Como podemos observar nas Figura 6 e 7, *Guazuma ulmifolia* e *Aegiphila integrifolia*, seguida da *Parapiptadenia rigida*, apresentaram os maiores teores de de biomassa e carbono das 24 espécies estudadas, e isso se deve aos seus traços funcionais (Tabela 2), que as colocaram em vantagem em frente às demais espécies. O que era esperado considerando que *G. ulmifolia* e *A. integrifolia* são espécies pioneiras de crescimento rápido e que a *P. rigida*, apesar de não ser pioneira, é uma espécie que, na área, demonstrou ter crescimento rápido (Chiarotto, 2023).

A *G. ulmifolia*, apresentou o segundo maior diâmetro, que resultou na segunda maior área basal (284,62 cm²), altura média de quase 7 m e densidades de

madeira de $0,45 \text{ g/cm}^3$. Santos *et al.* (2025) e Antunes *et al.* (2025) destacam a influência do diâmetro e da altura da espécie no estoque de carbono das árvores. Claro, eles não menosprezam a importância da densidade da madeira, mas no caso da *Guazuma ulmifolia*, os parâmetros que a levaram a ser a espécie com maior estoque de carbono (26,35 Kg) foram o diâmetro e a altura.

No caso da *Aegiphila integrifolia* e *Parapiptadenia rigida*, existiam espécies com diâmetros maiores que resultaram em áreas basais maiores ($117,95 \text{ cm}^2$ e $76,25 \text{ cm}^2$, respectivamente), mas suas alturas médias eram de 5,13 m e 5,19 m, respectivamente, e suas densidades de madeira de $0,86 \text{ g/cm}^3$ e $1,07 \text{ g/cm}^3$, respectivamente, umas das mais altas. De acordo com Antunes *et al.* (2025) e Fobane *et al.* (2024), além do diâmetro e altura, a densidade da madeira das espécies arbóreas contribui muito para o estoque de carbono das árvores, o que explica o estoque de carbono alto de *A. integrifolia* e de *P. rigida*.

As espécies *Inga vera* subsp. *affinis* e *Heliocarpus popayanensis* apresentaram traços funcionais distintos que as colocaram entre umas das espécies a acumular mais biomassa e carbono. O *I. vera* subsp. *affinis* tem um diâmetro que resulta em área basal de $138,47 \text{ cm}^2$, altura de 5,45 m, uma das mais altas, e densidade de $0,59 \text{ g/cm}^3$, enquanto o *H. popayanensis* possui um diâmetro que resultou em área basal de $343,36 \text{ cm}^2$, a maior entre todas, altura média de 4,25 m e densidade de $0,24 \text{ g/cm}^3$.

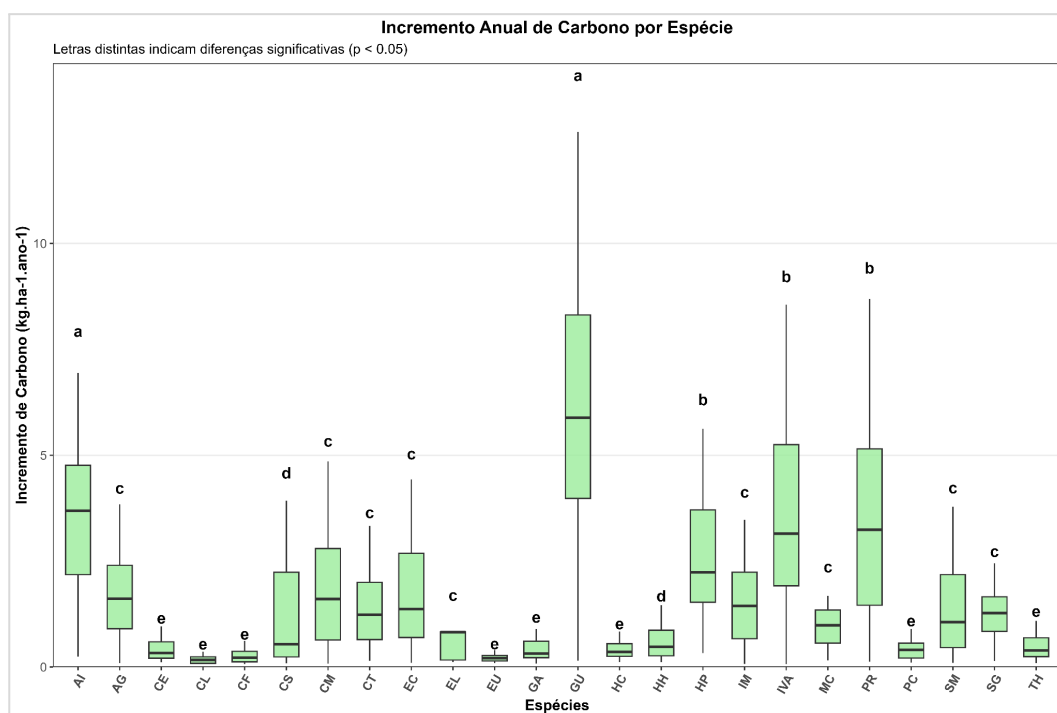
No caso do *I. vera* subsp. *affinis* temos a altura e, de certa forma, mesmo não sendo uma das maiores, a densidade da madeira o ajudando a ficar entre umas das espécies que mais acumulou biomassa e carbono, enquanto *H. popayanensis* teve a seu favor o diâmetro e a altura, e como desvantagem a densidade, a mais baixa das 24 espécies da área de restauração.

As espécies que apresentaram os menores teores de biomassa e carbono foram *Cedrela fissilis*, *Eugenia uniflora* e *Cariniana legalis*, resultados também esperados, não somente por seus traços funcionais, mas pelo manejo ou ataque de pragas que acabou prejudicando o desenvolvimento de duas das espécies ao longo dos anos.

As três espécies têm crescimento lento (Chiarotto, 2023), então seus

***Legenda:** AI - *Aegiphila integrifolia*, AG - *Astronium graveolens*, CE - *Cariniana estrellensis*, CL - *Cariniana legalis*, CF - *Cedrela fissilis*, CS - *Ceiba speciosa*, CM - *Citharexylum myrianthum*, CT - *Cordia trichotoma*, EC - *Enterolobium contortisiliquum*, EL - *Esenbeckia leiocarpa*, EU - *Eugenia uniflora*, GA - *Genipa americana*, GU - *Guazuma ulmifolia*, HC - *Handroanthus chrysotrichus*, HH - *Handroanthus heptaphyllus*, HP - *Heliocarpus popayanensis*, IM - *Inga marginata*, IVA - *Inga vera* subsp. *affinis*, MC - *Myrsine coriacea*, PR - *Parapiptadenia rigida*, PC - *Psidium cattleianum*, SM - *Senna multijuga*, SG - *Solanum granuloseprosum* e TH - *Tabernaemontana hystrix*.

Figura 7. Incremento anual de carbono por espécie*.



Fonte: Elaborado pela autora no software R (2025).

***Legenda:** AI - *Aegiphila integrifolia*, AG - *Astronium graveolens*, CE - *Cariniana estrellensis*, CL - *Cariniana legalis*, CF - *Cedrela fissilis*, CS - *Ceiba speciosa*, CM - *Citharexylum myrianthum*, CT - *Cordia trichotoma*, EC - *Enterolobium contortisiliquum*, EL - *Esenbeckia leiocarpa*, EU - *Eugenia uniflora*, GA - *Genipa americana*, GU - *Guazuma ulmifolia*, HC - *Handroanthus chrysotrichus*, HH - *Handroanthus heptaphyllus*, HP - *Heliocarpus popayanensis*, IM - *Inga marginata*, IVA - *Inga vera* subsp. *affinis*, MC - *Myrsine coriacea*, PR - *Parapiptadenia rigida*, PC - *Psidium cattleianum*, SM - *Senna multijuga*, SG - *Solanum granuloseprosum* e TH - *Tabernaemontana hystrix*.

Nas Figuras 6 e 7, observamos o incremento anual de biomassa e carbono das espécies, com as espécies que mais estocaram biomassa e carbono sendo também as que mais tiveram incremento de biomassa e carbono na área por ano.

Guazuma ulmifolia, *Aegiphila integrifolia*, *Parapiptadenia rigida*, *Inga vera* subsp. *affinis* e *Heliocarpus popayanensis* são pioneiras (Chiarotto, 2023), com crescimento inicial rápido (Embrapa, 2006), tanto em diâmetro quanto em altura, o que as tornas espécies a se considerar com muita seriedade quando se está planejando a instalação de uma área de restauração com objetivo de captura e estoque de carbono rápidos. Além disso, por serem pioneiras, suas copas geralmente também são maiores, o que faz com que recubra a área e acelere o processo de recuperação do ecossistema.

Astronium graveolens, *Citharexylum myrianthum*, *Inga marginata*, *Enterolobium contortisiliquum*, *Solanum granuloseprosum*, *Cordia trichotoma*, *Senna multijuga*, *Myrsine coriacea* e *Esenbeckia leiocarpa*, estatisticamente, apresentaram incremento de biomassa e carbono mediano. Algumas destas espécies são pioneiras de crescimento rápido, outras não são pioneiras, tendo crescimento médio ou rápido dependendo do ambiente ou crescimento lento, tendo sido consideradas deste grupo provavelmente porque ao menos um de seus traços funcionais não é favorável frente aos outros. *Astronium graveolens*, por exemplo, tem um diâmetro que resultou em área basal menor que os classificados como “a” e “b”, sendo o oposto de *H. popayanensis*, que se manteve como “b” principalmente por causa de sua área basal grande, apesar de sua densidade ser a menor entre as espécies, ele acabou classificado como “c”.

As demais espécies com incremento de biomassa e carbono não tão alto, mas também não extremamente baixo, provavelmente se encaixam neste grupo, como podemos ver nas Figuras 6 e 7, pois apesar de não terem traços funcionais ruins, não se tem mais de um se destacando ao mesmo tempo para captar mais biomassa e carbono ao longo dos anos. Ao menos nos primeiros anos da área de restauração florestal.

Ceiba speciosa e *Handroanthus heptaphyllus* tem incremento de biomassa e carbono baixo, mas não tão baixo quanto *Psidium cattleianum*, *Tabernaemontana hystrix*, *Handroanthus chrysotrichus*, *Cariniana estrellensis*, *enipa americana* e, especialmente *Cedrela fissilis*, *Eugenia uniflora* e *Cariniana legalis*.

As espécies que tiveram o menor incremento de biomassa e carbono na área

(*Cedrela fissilis*, *Eugenia uniflora* e *Cariniana legalis*) são de crescimento lento (Chiarotto, 2023), então não era esperado que tivessem uma quantidade expressiva de incremento de biomassa ou carbono nos anos iniciais da restauração florestal. Segundo Gann *et al.* (2019), a restauração florestal deve procurar um equilíbrio no qual seu objetivo se alinhe a critérios ecológicos mais amplos e duradouros.

Denardi (2023) e Yulizah *et al.* (2023), apontam que espécies como a *E. uniflora* tendem a ter alto teor de carbono em áreas de restauração com mais de 10 anos, pois podem atingir grandes diâmetros e altura no decorrer deste tempo. Enquanto Antunes *et al.* (2025) e Coelho *et al.* (2022) descobriram que nas áreas em que fizeram suas pesquisas, árvores da família das Myrtaceae, como é o caso não apenas de *E. uniflora* do presente estudo, mas também do *Psidium cattleianum*, podem vir a ser espécies importantes para o estoque de carbono em área de restauração maduras (+10 anos) pois tem facilidade de dispersão e mesmo que não cheguem a alturas ou diâmetros tão grandes, por ter muitos indivíduos na área estarão captando uma boa quantidade de carbono.

Isso mostra que, como apontado por Gann *et al.* (2019), espécies que não incrementam muita biomassa e carbono agora não devem ser descartadas. Embora espécies como *C. fissilis*, *E. uniflora*, *C. legalis* e as demais espécies que apresentaram incremento baixo, tenham incremento inferior às demais espécies na área estudada e acumulem biomassa e carbono lentamente nos primeiros anos, as árvores destas espécies são longevas, podendo acumular grandes quantidades de carbono a longo prazo, especialmente a *C. fissilis* e *C. legalis*, que são umas das maiores árvores da Mata Atlântica (Carvalho, 2003a, Carvalho, 2003b). Embora seja interessante priorizar espécies que rapidamente acumulam carbono nos plantios de restauração voltados a este serviço ecossistêmico, não se pode esquecer o ciclo da vida das espécies. Se as espécies que mais acumulam morrem cedo e não forem substituídas por outras espécies, plantadas ou que colonizarem a área do entorno, o estoque de carbono não será duradouro e sustentável. Em suma, não se pode focar apenas no carbono de agora e esquecer dos outros processos que ditam a restauração florestal.

Tabela 1. Médias de Área Basal (m^2) calculadas a partir do diâmetro a 30 cm do solo (D30) e altura (H); densidade da madeira (ρ); medianas de Biomassa Total (Kg), Estoque de Carbono (Kg), Incremento de Biomassa ($kg\cdot ha^{-1}\cdot ano^{-1}$), Incremento de Carbono ($kg\cdot ha^{-1}\cdot ano^{-1}$) e letras de comparação estatísticas das 24 espécies da área de restauração experimental da UFSCar – Araras. Letras distintas indicam diferença significativa ($p > 0,05$).

Espécies	Área Basal (m^2)	H (m)	ρ (g/cm^3)	Biomassa total (kg)	Estoque de Carbono (kg)	Incremento de biomassa ($kg\cdot ha^{-1}\cdot ano^{-1}$)	Incremento de carbono ($kg\cdot ha^{-1}\cdot ano^{-1}$)
<i>Guazuma ulmifolia</i> Lam.	0,028	6,99	0,45	52,69 a	26,35 a	11,93 a	5,97 a
<i>Aegiphila integrifolia</i> (Jacq.) Moldenke	0,012	5,13	0,86	33,35 a	16,67 a	7,55 a	3,77 a
<i>Parapiptadenia rigida</i> (Benth.) Brenan	0,008	5,19	1,07	28,76 b	14,38 b	6,51 b	3,26 b
<i>Inga vera subsp. affinis</i> (DC.) T.D.Penn.	0,014	5,43	0,59	27,90 b	13,95 b	6,32 b	3,16 b
<i>Heliocarpus popayanensis</i> Kunth	0,034	4,25	0,24	19,74 b	9,87 b	4,47 b	2,23 b
<i>Astronium graveolens</i> Jacq.	0,006	3,99	0,82	14,25 c	7,13 c	3,23 c	1,61 c
<i>Citharexylum myrianthum</i> Cham.	0,010	4,61	0,45	14,19 c	7,09 c	3,21 c	1,61 c
<i>Inga marginata</i> Willd.	0,009	4,05	0,45	12,77 c	6,38 c	2,89 c	1,45 c
<i>Enterolobium contortisiliquum</i> (Vell.) Morong	0,009	3,9	0,53	12,07 c	6,04 c	2,73 c	1,37 c
<i>Solanum granulosoleprosum</i> Dunal	0,009	3,97	0,40	11,27 c	5,64 c	2,55 c	1,28 c
<i>Cordia trichotoma</i> (Vell.) Arráb. ex Steud.	0,005	4,91	0,56	10,91 c	5,46 c	2,47 c	1,24 c
<i>Senna multijuga</i> (Rich.) H.S.Irwin & Barneby	0,009	3,39	0,57	9,35 c	4,68 c	2,12 c	1,06 c
<i>Myrsine coriacea</i> (Sw.) R.Br. ex Roem. & Schult.	0,003	4,21	0,70	8,70 c	4,35 c	1,97 c	0,98 c
<i>Esenbeckia leiocarpa</i> Engl.	0,002	2,79	0,97	7,28 c	3,64 c	1,65 c	0,82 c
<i>Ceiba speciosa</i> (A. St.-Hil.) Ravenna	0,008	2,95	0,56	4,79 d	2,39 d	1,08 d	0,54 d
<i>Handroanthus heptaphyllus</i> (Vell.) Mattos	0,002	3,17	0,81	4,22 d	2,11 d	0,96 d	0,48 d

Espécies	Área Basal (m ²)	H (m)	ρ (g/cm ³)	Biomassa total (kg)	Estoque de Carbono (kg)	Incremento de biomassa (kg.ha ⁻¹ .ano ⁻¹)	Incremento de carbono (kg.ha ⁻¹ .ano ⁻¹)
<i>Psidium cattleianum</i> Sabine	0,001	2,21	1,12	3,60 e	1,8 e	0,81 e	0,41 e
<i>Tabernaemontana hystrix</i> Steud.	0,003	2,95	0,52*	3,47 e	1,74 e	0,79 e	0,39 e
<i>Handroanthus chrysotrichus</i> (Mart. ex DC) Mattos	0,001	2,77	0,92	3,17 e	1,59 e	0,72 e	0,36 e
<i>Cariniana estrellensis</i> (Raddi) Kuntze	0,002	2,69	0,78	2,95 e	1,47 e	0,67 e	0,33 e
<i>Genipa americana</i> L.	0,002	3,22	0,5	2,82 e	1,41 e	0,64 e	0,32 e
<i>Cedrela fissilis</i> Vell.	0,002	1,97	0,42	1,96 e	0,98 e	0,44 e	0,22 e
<i>Eugenia uniflora</i> L.	0,001	2,04	0,76	1,82 e	0,91 e	0,41 e	0,21 e
<i>Cariniana legalis</i> (Mart.) Kuntze	0,001	2,57	0,34	1,47 e	0,74 e	0,33 e	0,17 e

Fonte: elaborado pela autora (2025).

* Densidade pertencente à *Tabernaemontana catharinensis*.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Quando a restauração florestal tem como foco captura e estoque de carbono, é necessário que se tenha um conhecimento prévio do quanto uma espécie pode capturar de carbono para que se faça um planejamento de implementação eficiente.

A partir dos resultados obtidos, estimou-se quanto carbono 24 espécies nativas da Mata Atlântica estocam em 53 meses e quanto carbono podem capturar por ano nos anos iniciais (>4 anos) de implantação de área de restauração florestal. Há grande diferença entre as espécies no acúmulo de biomassa e carbono nos anos iniciais de plantio. *Guazuma ulmifolia*, que é uma espécie de crescimento rápido, se destacou dentre as espécies nos anos iniciais de implantação da restauração. No entanto, não se deve levar em consideração apenas a quantidade de carbono que a espécie pode estocar nos primeiros anos, deve-se ser levado em consideração, junto a este aspecto, a interação da espécie no sistema e os benefícios futuros que ela pode trazer para captura de carbono e outros processos ecológicos chaves à restauração dos ecossistemas.

O carbono que cada uma das 24 espécies pode capturar foi estimado, servindo de auxílio para o planejamento da restauração com foco em captura de carbono para futuros plantios na Mata Atlântica. Além disso, o incremento médio da área como um todo também foi gerado e está disponível para estudos que avaliam o potencial de estoque de biomassa e carbono para plantios florestais na Mata Atlântica.

Para futuros trabalhos, recomenda-se: **(i)** manter o acompanhamento do plantio em novas mensurações para construir séries temporais de estoque e incremento; **(ii)** registrar e controlar de forma rigorosa práticas de manejo e ocorrências de dano, reduzindo interferências que afetem crescimento e sobrevivência de árvores nativas implantadas; **(iii)** aprimorar a base de densidade da madeira utilizada, priorizando valores específicos por espécie quando possível; e **(iv)** ampliar a análise por compartimentos de biomassa e, quando aplicável, integrar avaliações de carbono no solo, para uma compreensão mais completa do balanço de carbono em restauração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANTUNES, K. *et al.* Large-sized trees and altitude drive aboveground carbon stock in Brazilian Atlantic Cloud Forests: An approach based on carbon hyperdominant taxa. **Science of The Total Environment**, v. 962, p. 178448, 25 jan. 2025.
- AYAD, H. *et al.* Assessing deforestation in the Brazilian forests: an econometric inquiry into the load capacity curve for deforestation. **Forest policy and Economics**, v. 159, p. 103-135, 1 fev. 2024.
- BASKERVILLE, G. L. Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 2, n. 1, p. 49–53, 1972.
- BRASIL. **Lei nº 11.428, de 22 de dezembro de 2006**. Dispõe sobre a utilização e proteção da vegetação nativa do Bioma Mata Atlântica e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 26 dez. 2006.
- BRASIL. **Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012**. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nº 6.938/1981, nº 9.393/1996 e nº 11.428/2006; revoga as Leis nº 4.771/1965 e nº 7.754/1989, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 28 maio 2012.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Plano Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa (PLANAVEG)**. Brasília, DF: MMA, 2017.
- BROWN, S. **Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer**. Rome: FAO, 1997. (FAO Forestry Paper, 134).
- CARVALHO, P. E. R. Espécies arbóreas brasileiras. Cedro: *Cedrela fissilis*. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica; Colombo: Embrapa Florestas, 2003. v. 1. p. 383-393.a
- CARVALHO, P. E. R. Espécies arbóreas brasileiras. Jequitibá-rosa: *Cariniana legalis*. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica; Colombo: Embrapa Florestas, 2003. v. 1. p. 629-636.b
- CARVALHO, P. E. R. Espécies arbóreas brasileiras. Guaritá: *Astronium graveolens*. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica; Colombo: Embrapa Florestas, 2003. v. 1. p. 629-636.c
- CHAVE, J. *et al.* Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. **Global Change Biology**, Hoboken, v. 20, n. 10, p. 3177–3190, 2014.
- CHAZDON, R. L. **Second growth**: the promise of tropical forest regeneration in an age of deforestation. Chicago: University of Chicago Press, 2014.
- CHIAROTTO, A. B. S. **Otimizando plantios de restauração florestal com alta diversidade**: estratégias para inserir espécies arbóreas de crescimento lento. 2023. Dissertação — Universidade de São Paulo, [s.l.], 2023.

- COELHO, A. J. P. *et al.* Atlantic Forest recovery after long-term eucalyptus plantations: The role of zoochoric and shade-tolerant tree species on carbon stock. **Forest Ecology and Management**, v. 503, p. 119-789, 1 jan. 2022.
- DENARDI, L. da. S. **Florística e estoque de carbono em áreas em processo de restauração florestal no noroeste do Rio Grande do Sul**. 30 nov. 2023.
- EMBRAPA. **Espécies nativas recomendadas para recuperação ambiental no estado do Paraná: em solos não degradados [recurso eletrônico]** / Antônio Aparecido Carpanezi, Odete T. Bertol Carpanezi. - Dados eletrônicos. - Colombo: Embrapa Florestal, 2006.
- FEREZ, R. M. *et al.* Silvicultural opportunities for increasing carbon stock in restoration of Atlantic forests in Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 350, p. 40–45, 2015.
- FOBANE, J. L. *et al.* Tree community, vegetation structure and aboveground carbon storage in Atlantic tropical forests of Cameroon. **Heliyon**, v. 10, n. 24, p. e41005, 30 dez. 2024.
- FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA; INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Atlas dos remanescentes florestais da Mata Atlântica: período 2023–2024**. São Paulo: Fundação SOS Mata Atlântica; São José dos Campos: INPE, 2025.
- GANN, G. D. *et al.* International principles and standards for the practice of ecological restoration. **Restoration Ecology**, Washington, DC, v. 27, n. S1, p. S1–S46, 2019.
- IPCC. **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Kanagawa: Institute for Global Environmental Strategies (IGES), 2006.
- IPCC. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- IPCC. **Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change**. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.
- IPCC. **Climate Change 2023: Synthesis Report**. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023.
- KÖPPEN, W. **Climatologia: con un estudio de los climas de la tierra**. México, DF: Fondo de Cultura Económica, 1948.
- LIMA, M. I. de O.; OLIVEIRA, A. H. Levantamento do meio físico e classificação de terras pelo Sistema de Capacidade de Uso do Solo no CCA/UFSCar. **Revista Georaguaia**, v. 14, n. 2, p. 1–20, 2024.
- MORAES, A. P. P. *et al.* Estimativa do estoque volumétrico e acúmulo de biomassa e carbono em uma floresta ombrófila densa na Floresta Nacional de Carajás. **Biodiversidade Brasileira**, v. 15, n. 1, p. 13–24, 17 fev. 2025.

- MORES, G. J. UNESP. **Biomassa arbórea e carbono em áreas de restauração da Mata Atlântica**. 1 mar. 2024.
- MUSA, M. B. *et al.* Optimal plot size and shape for sampling growing stocks and tree species diversity in tropical forests: Results from a forest inventory in Hazarikhil Wildlife Sanctuary of Bangladesh. **Forest Ecology and Management**, v. 585, p. 122679, 1 jun. 2025.
- OLIVEIRA, L. Z. *et al.* Towards the fulfillment of a knowledge gap: wood densities for species of the Subtropical Atlantic Forest. **Data**, v. 4, n. 3. 2019.
- PAN, Y. *et al.* A large and persistent carbon sink in the world's forests. **Science**, Washington, DC, v. 333, n. 6045, p. 988–993, 2011.
- POORTER, L. *et al.* Biomass resilience of Neotropical secondary forests. **Nature**, London, v. 530, p. 211–214, 2016.
- QGIS DEVELOPMENT TEAM. **QGIS Geographic Information System**. Versão 3.44.6 “Solothurn”. 2025. Disponível em: <<https://qgis.org/download/>>. Acesso em: 1 nov. 2025.
- R: The R Project for Statistical Computing. Disponível em: <<https://www.r-project.org/>>. Acesso em: 15 nov. 2025.
- RIBEIRO, M. C. *et al.* The Brazilian Atlantic Forest: How much is left, and how is the remaining forest distributed? **Biological Conservation**, Amsterdam, v. 142, n. 6, p. 1141–1153, 2009.
- SANTOS, A. B. M. *et al.* Taxonomic identity, but not evolutionary relatedness, determines the carbon stock and uptake of tropical forests trees. **Acta Ecológica**, v. 126, p. 104065, 1 mar. 2025.
- SILVA, A. C. F. da. *et al.* Teores de carbono em espécies florestais da Caatinga. **Ciência Florestal**, v. 32, p. 71–85, 2022.
- SIMOVIC, M. *et al.* Functional traits and size interact to influence growth and carbon sequestration among trees in urban greenspaces. **Functional Ecology**, v. 38, n. 4, p. 967–983, 2024.
- SPRUGEL, D. G. Correcting for bias in log-transformed allometric equations. **Ecology**, Washington, DC, v. 64, n. 1, p. 209–210, 1983.
- TAI, H. *et al.* Construction of Artificial Forest Point Clouds by Laser SLAM Technology and Estimation of Carbon Storage. **Applied Sciences**, v. 12, n. 21, p. 10838, jan. 2022.
- UNFCCC. **Paris Agreement**. Bonn: United Nations Framework Convention on Climate Change, 2015.
- VENDITE, G. G. *et al.* O solo e as mudanças climáticas: estratégias para estoque de carbono. In: ATENA EDITORA (org.). **Meio Ambiente e Sustentabilidade: Estratégias para a preservação e o desenvolvimento 3**. Ponta Grossa, PR: Atena Editora, 2025. p. 242–262. DOI: 10.22533/at.ed.1981325180714.

VENDITE, G. G.; OLIVEIRA, A. H. Carbon farming: potencial de mitigação das mudanças climáticas em solos agrícolas brasileiros. **Revista de Geopolítica**, [S. l.], v. 16, n. 5, p. e993, 2025. DOI: 10.56238/revgeov16n5-168.

ZANNE, A. E. *et al.* **Global Wood Density Database**. 2009. (Base de dados).