



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS**

LEANDRO NASCIMENTO SANTOS

**BIOMASSA E CARBONO DO LENHO DE *Tachigali vulgaris* EM UM PLANTIO
EXPERIMENTAL NA AMAZÔNIA ORIENTAL**

**BELÉM-PA
2025**

LEANDRO NASCIMENTO SANTOS

**BIOMASSA E CARBONO DO LENHO DE *Tachigali vulgaris* EM UM PLANTIO
EXPERIMENTAL NA AMAZÔNIA ORIENTAL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte dos requisitos exigidos no Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais. Área de concentração: Tecnologias de Recursos Florestais, para a obtenção de Título de Mestre.

Orientador:

Prof. Dr. Thiago de Paula Protásio

Coorientador:

Prof. Dr. Rodrigo Geroni Mendes Nascimento

Coorientadora:

Prof^a. Dr^a. Ximena Mendes de Oliveira

**BELÉM-PA
2025**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Bibliotecas da Universidade Federal Rural da Amazônia
Gerada automaticamente mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S237b Santos, Leandro Nascimento
Biomassa e carbono do lenho de Tachigali vulgaris em um plantio experimental na Amazônia Oriental
/ Leandro Nascimento Santos. - 2025.
68 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado) - Programa de PÓS-GRADUAÇÃO em Ciências Florestais (PPGCF), Campus
Universitário de Belém, Universidade Federal Rural Da Amazônia, Belém, 2025.

Orientador: Prof. Dr. Thiago de Paula Protásio

Coorientador: Prof. Dr. Rodrigo Geroni Mendes Nascimento e Profa. Dra. Ximena Mendes de
Oliveira.

1. Amazônia. 2. plantações florestais. 3. tachi-branco. 4. produção de biomassa. 5. estoque de carbono. I.
Protásio, Thiago de Paula. *orient.* II. Título

CDD 333.9539

**BIOMASSA E CARBONO DO LENHO DE *Tachigali vulgaris* EM UM PLANTIO
EXPERIMENTAL NA AMAZÔNIA ORIENTAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais da Universidade Federal Rural da Amazônia como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências Florestais.

Data da aprovação: 27/02/2025

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Thiago de Paula Protásio – Orientador
Universidade Federal de Lavras – UFLA

Prof. Dr. Pedro Henrique Oliveira Simões – 1ª Examinador
Universidade Federal de Mato Grosso – UFMT

Prof. Dr. Samuel José Silva Soares da Rocha – 2ª Examinador
Universidade Federal de Lavras – UFLA

Prof. Dr. Álvaro Augusto Vieira Soares – 3ª Examinador
Universidade Federal de Uberlândia – UFU

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus pela realização deste trabalho, um marco fundamental em minha trajetória. Ele me concedeu força e fé em todos os momentos, permitindo que superasse os obstáculos com determinação.

À minha família, especialmente aos meus pais, que sempre me apoiaram nos estudos, oferecendo incentivo, força e acreditando em mim e na minha vontade de vencer durante o período de graduação e pós-graduação na Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA).

Ao comitê de orientação, composto por Rodrigo Geroni e Ximena Mendes, e ao meu orientador, professor Thiago de Paula Protásio, pela oportunidade concedida de aprimorar minha vida profissional. Agradeço a confiança, orientação, paciência e por terem dedicado tempo para me ajudar, além de serem exemplos de ética e profissionalismo.

Aos Professores, Rodrigo Do Vale e Pedro Simões, por ter cedido o plantio experimental de *Tachigali vulgaris* para a realização desta pesquisa e pela valiosa ajuda nas correções.

Ao Laboratório de Mensuração e Manejo dos Recursos Florestais (LABFOR), agradeço por todas as práticas em que participei, que enriqueceram meu conhecimento. Aos meus amigos de laboratório: Denner Santos, Yuri Cardoso, Marina Bastos, Lucas Viana, Deisiane da Cruz, Camila Mainardi, Andrei Mendes, Kaio Pereira, Patrícia Muribeca, Valter Saldanha e Bruno Fernandes. Em especial, sou extremamente agradecido a Quinny Rocha pelo incentivo, força, paciência e pelos ensinamentos que foram fundamentais desde a qualificação, me ajudando imensamente ao longo de todo o mestrado. Muito obrigado!

Ao Laboratório de Celulose da Amazônia (AmazonCel), agradeço o espaço cedido para a realização das minhas análises. Minha gratidão também a Lays Matos pelo acolhimento, carinho e apoio no laboratório e pelos seus valiosos ensinamentos sobre celulose. Aos amigos que fiz no AmazonCel: Ingryd Aranda, Suellem Gomes, Cristiano Santos, Valéria Pereira, Laís Raiol e Elesandra Araújo, fica minha enorme gratidão pelo companheirismo nesse período.

Ao Seu Alfredo, minha gratidão pela ajuda nos cortes dos discos de madeira e pelos ensinamentos de marcenaria e manuseio de máquinas de serra. Ao Seu Nara e à Dona Vaneide, conhecidos carinhosamente como casal “Dino”, agradeço a ajuda na coleta de dados.

Aos meus amigos Tamires Santos, Gustavo Borges, Rafael Caldeira e Jonathan Marques, minha imensa gratidão pelo apoio moral, motivacional e incentivo constantes, desde o início até a conclusão do mestrado.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais (PPGCF), e a Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisas (FAPESPA) pela concessão da bolsa de estudos.

RESUMO

As florestas plantadas são fundamentais na mitigação das mudanças climáticas, promovendo o uso sustentável da biomassa lenhosa para geração de energia e atuando como sumidouros de carbono, além de aliviar a pressão sobre as florestas nativas. No Brasil, as florestas plantadas são compostas principalmente por espécies do gênero *Eucalyptus*. No entanto, em regiões com características edafoclimáticas com clima equatorial, como a região norte do país, essas florestas enfrentam dificuldades para atender à demanda. Por isso, há necessidade crescente de diversificar as espécies utilizadas nas plantações florestais, a fim de atender a essa demanda e beneficiar diversos setores locais e regionais. Nesse contexto, *Tachigali vulgaris*, espécie nativa da Amazônia, destaca-se pela sua produtividade, devido ao rápido crescimento e às características tecnológicas, ecológicas e silviculturais que a tornam atrativa para plantios homogêneos, além de sua adaptação às condições ambientais da região. Assim, ampliar o conhecimento sobre a espécie e as práticas silviculturais será essencial para subsidiar futuras plantações. Este estudo teve como objetivo quantificar a biomassa e o estoque de carbono de um plantio experimental de *T. vulgaris*, que foi conduzido em uma área de 1,44 hectares, localizado no município de Igarapé-Açu, Pará, Brasil. O experimento foi instalado em 2016, em delineamento casualizado com quatro blocos, em esquema fatorial, considerando três níveis de fósforo (P_2O_5) (0; 65,22; 130,43 kg ha⁻¹), nitrogênio (N) (0; 88,89; 177,78 kg ha⁻¹) e potássio (K_2O) (0; 100; 200 kg ha⁻¹), totalizando 27 tratamentos, sendo o tratamento 1 a testemunha, em que os níveis dos três nutrientes são nulos. As 40 árvores foram cubadas pelo método de Hohenadl, aos 93 meses de idade, sendo selecionadas com base na distribuição diamétrica. Foram avaliados o diâmetro à altura do peito (DAP), altura total (m) e volume total (m³). Além disso, amostras de seções transversais do tronco foram coletadas em diferentes alturas para determinar a densidade básica da madeira e, posteriormente, estimar a biomassa e o estoque de carbono. Aos 93 meses de idade, as árvores apresentaram volumes sem casca variando de 0,0138 a 0,4651 m³, com incremento médio anual (IMA) sem casca de 28,4 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ e com casca de 31,3 m³ ha⁻¹ ano⁻¹. As densidades básicas observadas variaram entre 0,358 a 0,584 g cm⁻³. Os valores de biomassa seca e estoque de carbono oscilaram de 559,03 a 67.106,27 kg ha⁻¹ equivalente a (0,56 a 67,11 Mg ha⁻¹) e de 278,40 a 33.418,92 kg ha⁻¹ equivalentes a (0,28 a 33,42 Mg ha⁻¹), respectivamente. Esses dados fornecem um suporte para futuras pesquisas sobre *Tachigali vulgaris*, com implicações significativas para o manejo sustentável, a compensação de carbono e a recuperação de áreas degradadas na Amazônia.

Palavras-chaves: Amazônia, plantações florestais, Tachi-branco, produção de biomassa, estoque de carbono.

ABSTRACT

Planted forests are key to mitigating climate change, promoting the sustainable use of woody biomass for energy generation and acting as carbon sinks, as well as relieving pressure on native forests. In Brazil, planted forests are mainly made up of species of the *Eucalyptus* genus. However, in regions with particular soil and climate characteristics, such as the north of the country, these forests face difficulties in meeting demand. For this reason, there is a growing need to diversify the species used in forest plantations in order to meet this demand and benefit various local and regional sectors. In this context, *Tachigali vulgaris*, a species native to the Amazonia, stands out for its productivity, due to its rapid growth and the technological, ecological and silvicultural characteristics that make it attractive for homogeneous plantations, as well as its adaptation to the region's environmental conditions. Therefore, expanding knowledge about the species and silvicultural practices will be essential to support future plantations. This study aimed to quantify the biomass and carbon stock of an experimental plantation of *T. vulgaris*, which was conducted in an area of 1.44 hectares, located in the municipality of Igarapé-Açu, Pará, Brazil. The experiment was installed in 2016, in a randomized design with four blocks, in a factorial scheme, considering three levels of phosphorus (P_2O_5) (0; 65.22; 130.43 Kg ha⁻¹), nitrogen (N) (0; 88.89; 177.78 Kg ha⁻¹) and potassium (K₂O) (0; 100; 200 Kg ha⁻¹), totaling 27 treatments, with treatment 1 being the control, where the levels of the three nutrients are zero. The 40 trees were cubed using the Hohenadl method at 93 months of age and selected based on their diameter distribution. Diameter at breast height (DBH), total height (m) and total volume (m³) were evaluated. In addition, samples of cross sections of the trunk were collected at different heights to determine the basic density of the wood and, subsequently, to estimate the biomass and carbon stock. At 93 months of age, the trees presented volumes without bark ranging from 0.0138 to 0.4651 m³, with an average annual increment (MAI) without bark of 28.4 m³ ha⁻¹ year⁻¹ and with bark of 31.3 m³ ha⁻¹ year⁻¹. The observed basic densities ranged from 0.358 to 0.584 g cm⁻³. The dry biomass and carbon stock values ranged from 559.03 to 67,106.27 kg ha⁻¹ equivalent to (0.56 to 67.11 Mg ha⁻¹) and from 278.40 to 33,418.92 kg ha⁻¹ equivalent to (0.28 to 33.42 Mg ha⁻¹), respectively. These data provide support for future research on *Tachigali vulgaris*, with significant implications for sustainable management, carbon offsetting, and recovery of degraded areas in the Amazonia.

Keywords: Amazonia, forest plantations, Tachi-branco, biomass production, carbon stock.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Pluviosidade mensal (mm), temperaturas do ar (°C) máximas e mínimas mensais, no município de Igarapé-Açu, Pará, Brasil.	30
Figura 2. Plantio experimental de <i>Tachigali vulgaris</i> no município de Igarapé-Açu, Pará, Brasil.....	34
Figura 3. Croqui do plantio de <i>Tachigali vulgaris</i> , localizado na Fazenda escola de Igarapé-Açu, pertencente à Universidade Federal Rural da Amazônia, no município de Igarapé-Açu, Pará, Brasil.	36
Figura 4. Croqui após a revitalização do plantio de <i>Tachigali vulgaris</i> , localizado na Fazenda escola de Igarapé-Açu, pertencente à	37
Figura 5. Fluxograma de atividades referente ao plantio de <i>Tachigali vulgaris</i> , no município de Igarapé-Açu, Pará, Brasil.....	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Caracterização química do solo da área experimental do plantio, no município de Igarapé-Açu, Pará, Brasil.....	33
Tabela 2. Caracterização física do solo da área experimental do plantio, no município de Igarapé-Açu, Pará, Brasil.....	33
Tabela 3. Nutrientes com suas respectivas fontes (produto comercial).....	34
Tabela 4. Adubação e dosagem (kg ha^{-1}) nos diferentes tratamentos.....	35

Sumário

APRESENTAÇÃO GERAL DE PESQUISA	11
1 CONTEXTUALIZAÇÃO	13
1.1 Objetivos	14
1.1.1 <i>Objetivo geral</i>	14
1.1.2 <i>Objetivos específicos</i>	14
1.2 Questões científicas e hipóteses	14
2 REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1 Florestas plantadas	16
2.2 <i>Tachigali vulgaris</i>.....	17
2.3 Efeitos da adubação no crescimento e na densidade básica da madeira de espécies nativas na Amazônia.....	19
2.4 Biomassa Florestal	20
2.4.1 <i>Métodos de amostragem aplicados na quantificação da biomassa</i>	21
2.5 Estoque de carbono em espécies nativas na Amazônia	22
2.5.1 <i>Estimativa do estoque de carbono</i>	22
Referências	23
3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA.....	30
3.1 Descrição da área de estudo	30
3.1.1 <i>Localização</i>	30
3.1.2 <i>Clima</i>	30
3.1.3 <i>Topografia e Hidrografia</i>	31
3.1.4 <i>Geologia e solos</i>	31
3.1.5 <i>Tipologia florestal</i>	31
3.2 Descrição do plantio	31
3.2.1 <i>Projeto de pesquisa</i>	31
3.2.2 <i>Procedimentos da implantação</i>	32
3.2.3 <i>Tratamentos</i>	34
3.2.4 <i>Histórico de atividades realizadas</i>	38
ESTIMATIVA DE BIOMASSA E ESTOQUE DE CARBONO EM UM PLANTIO EXPERIMENTAL DE <i>Tachigali vulgaris</i> NA AMAZÔNIA	39
Resumo:	39
1 Introdução	39

2	Material e métodos.....	41
3	Resultados.....	51
4	Discussão	57
5	Conclusão.....	63
	Referências	63

APRESENTAÇÃO GERAL DE PESQUISA

Os dados coletados desta pesquisa provêm do projeto “Desempenho do crescimento vegetativo de tachi-branco em resposta a adubação de nutrientes, em ambientes de viveiro e de campo” pela Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), implantado pelo Prof. Dr. Rodrigo Silva do Vale, pelo Prof. Dr. Paulo de Tarso Eremita da Silva, pelo Prof. Dr. Pedro Henrique Oliveira Simões (UFMT), egresso do PPGCF, e pelo Dr. Lenilson Ferreira Palheta, também egresso do PPGCF. Todos são atuantes na área de silvicultura de florestas plantadas.

Este projeto faz parte das iniciativas da “Rede brasileira de pesquisa em crescimento e qualidade da madeira da espécie *Tachigali vulgaris* (tachi-branco) proveniente de plantios homogêneos para a geração de bioenergia na Amazônia”, coordenada pelo Prof. Thiago de Paula Protásio do PPGCF/UFRA, em parceria com a Universidade Federal Rural da Amazônia-UFRA, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”-ESALQ/USP, Universidade Federal do Amazonas- UFAM e, subsidiada pelo Programa Nacional de Cooperação Acadêmica na Amazônia- PROCAD AMAZÔNIA (Edital Nº 21/2018, Processo Nº 23038.005350/2018-78).

As sementes de *T. vulgaris* utilizadas para produção de mudas foram adquiridas através de produtor certificado, colhidas de matrizes localizadas no município de Santarém-PA (2° 26' 22"S; 54° 11' 55"W) e colocadas para germinar em sementeiras, com areia lavada como substrato. Em seguida após 30 dias do início da germinação, as plântulas foram transplantadas. Decorridos 8 meses, atingiram 40 cm de altura estando aptas ao plantio na área experimental, ocorrendo em 2016 na Fazenda Escola de Igarapé-Açu (FEIGA), pertencente a Universidade Federal Rural da Amazônia.

Em 2023, ocorreu a revitalização do experimento por meio de atividades realizadas por estudantes de graduação e pós-graduação do Laboratório de Mensuração e Manejo dos Recursos Florestais (LabFor). Essas atividades foram coordenadas pelo Prof. Dr. Rodrigo Geroni Mendes Nascimento, especialista na área de Mensuração Florestal e Manejo Florestal.

O objetivo principal é contribuir com os estudos relacionados à mensuração florestal, biomassa, estoque de carbono e qualidade da madeira da espécie de *T. vulgaris* (tachi-branco) provenientes de plantios na Amazônia, visando ao avanço do conhecimento sobre os aspectos silviculturais da espécie, por meio de ações de ensino e pesquisa que envolve alunos de pós-graduação e graduação. Até o momento, foram desenvolvidas duas teses no âmbito deste plantio experimental, as quais foram;

❖ 1ª Discente: Lenilson Ferreira Palheta; Título: “Crescimento vegetativo de *Tachigali vulgaris* L.G.Silva & H.C.Lima (tachi-branco) em resposta à adubação e condições

climáticas no município de Igarapé-açu/Pa”. Defesa realizada em: 2020. Orientador: Prof. Dr. João Olegário Pereira de Carvalho

❖ 2º Discente: Pedro Henrique Oliveira Simões; Título: “Crescimento, ecofisiologia e eficiência do uso de nutrientes de *Tachigali vulgaris* L. G. Silva & H. C. Lima fertilizado na Amazônia oriental”. Defesa realizada em: 2021. Orientador: Prof. Dr. João Olegário Pereira de Carvalho

1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Em 2023, as florestas plantadas no Brasil atingiram um recorde de 10,23 milhões de hectares, representando um crescimento de 0,3% em relação ao ano anterior (IBÁ, 2024). Esse avanço foi impulsionado pela crescente demanda global por produtos madeireiros, incluindo celulose, papel, carvão vegetal e móveis (Cunha et al., 2021; Florêncio et al., 2022). A maior parte das plantações, cerca de 9,75 milhões de hectares, é composta por espécies do gênero *Eucalyptus* e *Pinus*, predominando nas regiões Sudeste e Centro-Oeste. Em contraste, a região Norte possui uma participação reduzida, abrangendo apenas 4,29% da área total (IBÁ, 2024).

O crescimento do setor florestal no Brasil é resultado de avanços significativos em melhoramento genético, manejo silvicultural, fertilização do solo (Elli et al., 2020; Resquin et al., 2020). No entanto, esses plantios enfrentam desafios ambientais significativos, como escassez hídrica, secas prolongadas e aumento das temperaturas, fatores que podem comprometer o desenvolvimento e a produtividade das espécies cultivadas (Farias et al., 2016; Martins et al., 2022). Na Amazônia, a degradação ambiental impulsionada pelo desmatamento e pelos incêndios florestais representa um risco adicional, podendo levar a um "ponto de ruptura" ecológico com impactos severos no equilíbrio ambiental e na economia regional (Flores et al., 2024).

Nesse contexto, a diversificação de espécies surge como uma estratégia promissora para mitigar a vulnerabilidade dos plantios florestais frente às mudanças climáticas, além de ampliar o fornecimento de matéria-prima para a indústria regional (Guimarães et al., 2018; Teixeira et al., 2024). O cultivo de espécies nativas, em particular, apresenta um potencial significativo para equilibrar produção e conservação ambiental, reduzindo a pressão sobre as florestas naturais. Entre as espécies nativas da Amazônia com potencial para a silvicultura, destaca-se *Tachigali vulgaris* (popularmente conhecida como "tachi-branco" ou "carvoeiro"), uma árvore de rápido crescimento e elevada adaptabilidade, especialmente indicada para pequenos produtores devido ao seu potencial produtivo para fins energéticos e recuperação de áreas degradadas (Stallbaun et al., 2016, 2017).

A quantificação da biomassa e do estoque de carbono é fundamental para avaliar a contribuição das florestas plantadas na mitigação das mudanças climáticas. A biomassa pode ser estimada por métodos diretos (destrutivos), que envolvem a colheita e pesagem dos componentes arbóreos, ou por métodos indiretos (não destrutivos), baseados em variáveis dendrométricas, como diâmetro à altura do peito (DAP) e altura total. Essas medições são essenciais para monitorar o carbono armazenado nas florestas e compreender seu papel como

sumidouros de carbono, auxiliando na redução da concentração de CO₂ atmosférico (Ribeiro et al., 2015; Silva et al., 2015).

Apesar dos avanços nas pesquisas sobre biomassa e carbono em florestas plantadas no Brasil, há uma lacuna de estudos na Amazônia, especialmente no que se refere ao potencial da *Tachigali vulgaris* sob diferentes regimes de fertilizantes. Pesquisas anteriores exploraram sua viabilidade na recuperação de áreas degradadas e os efeitos do espaçamento e da bifurcação na qualidade da madeira (Farias et al., 2016; Silva et al., 2021; Barros-Junior et al., 2022; Lima et al., 2023; Moraes et al., 2023; Santos et al., 2023; Teixeira et al., 2023), mas ainda são necessários estudos aprofundados sobre sua biomassa e capacidade de sequestro de carbono em distintos sistemas de manejo. A ampliação dessas pesquisas pode fornecer dados essenciais para a otimização do cultivo de espécies nativas, contribuindo para estratégias sustentáveis de produção florestal e mitigação das mudanças climáticas.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

✓ Realizar a caracterização dendrométrica e da qualidade da madeira de um plantio experimental de *Tachigali vulgaris* no município de Igarapé-Açu, estado do Pará, Brasil.

1.1.2 Objetivos específicos

✓ Avaliar a evolução das variáveis dendrométricas das árvores de tachi branco ao longo do tempo.

✓ Analisar a distribuição espacial da mortalidade e das árvores de tachi branco em diferentes classes diamétricas.

✓ Quantificar a biomassa e carbono do lenho das árvores de tachi branco em diferentes classes diamétricas.

1.2 Questões científicas e hipóteses

Questão: Como as estimativas de biomassa e estoque de carbono variam entre as classes diamétricas em um plantio experimental de *Tachigali vulgaris* no município de Igarapé-Açu, e

qual a relação dessas variações com as características dendrométricas e a densidade básica da madeira?

Hipótese: As estimativas de biomassa e estoque de carbono em um plantio experimental de *Tachigali vulgaris* no município de Igarapé-Açu variam significativamente entre as classes diamétricas. Além disso, espera-se que essas estimativas estejam positivamente correlacionadas com características dendrométricas e com a densidade básica da madeira.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Florestas plantadas

Em 2023, no Brasil, cerca de 95% das áreas dedicadas à silvicultura foram compostas principalmente por espécies do gênero *Eucalyptus* e *Pinus*, representando, 7,8 e 1,9 milhões de hectares, respectivamente (IBÁ, 2024). As espécies do gênero *Eucalyptus*, em particular, destacam-se como uma das principais fontes para a produção de bioenergia no país, devido ao seu rápido crescimento e quanto às suas características ecológicas e propriedades de sua madeira, que são ideais principalmente para a produção de carvão vegetal, sendo essencial para a indústria siderúrgica e processos de bioenergia (Rodrigues et al., 2020).

O crescente aumento da demanda por madeira está motivando o setor florestal a investir cada vez mais em pesquisas, quanto ao melhoramento genético e no aprimoramento de práticas silviculturais, visando não apenas maiores níveis de produtividades das espécies, mas também com o propósito de redução o período necessário para o ciclo de corte das árvores (Costa et al., 2020; Carneiro et al., 2017). Estudos realizados em plantações florestais no Brasil indicam que, fatores como as variações climáticas, a tipologia do solo, a disponibilidade de água e o manejo adotado, impactam diretamente as taxas de incremento médio anual (IMA), principalmente em regiões tropicais e, com isso, impactando negativamente a produtividade dessas plantações (Binkley et al., 2020; Costa et al., 2020; Ryan et al., 2020). Nesse contexto, a utilização de espécies nativas para as plantações florestais surge como uma alternativa promissora para aumentar a diversificação e a quantidade de produtos madeireiros, especialmente na região amazônica, onde essas espécies se destacam por sua elevada adaptabilidade às condições ambientais locais (Neves et al., 2022; Orellana et al., 2018).

A adoção de espécies nativas em plantações florestais oferece vantagens significativas, não apenas em termos de adaptabilidade ao local, mas, também, na redução da pressão sobre as florestas naturais e como uma alternativa viável para a geração de renda para pequenos produtores rurais (Orellana et al., 2018). Contudo, os principais obstáculos para a expansão das áreas plantadas com espécies nativas estão ligados à falta de sistemas de produção consolidados, ao limitado conhecimento técnico disponível e aos custos elevados associados aos modelos de negócios florestais com espécies nativas e/ou sistemas agroflorestais (Batista et al., 2021).

Há uma discrepância entre o crescimento da demanda e a oferta de matéria-prima, destacando a necessidade de expandir as áreas destinadas à produção dessas espécies (Akhtari et al., 2019; Costa et al., 2014). Em conformidade com o Plano Nacional de Desenvolvimento de Florestas Plantadas (PNDF), o setor florestal brasileiro projeta a expansão da área plantada

em 2 milhões de hectares até 2030, além da geração de mais de 36 mil empregos diretos e indiretos (IBÁ, 2023).

2.2 *Tachigali vulgaris*

A espécie *Tachigali vulgaris* L. F. Gomes da Silva & H. C. Lima (Fig. 6), popularmente conhecida como tachi-branco ou carvoeiro (Carvalho, 2005), é uma espécie arbórea da família Fabaceae, amplamente distribuída em florestas tropicais da Amazônia. A inclusão do gênero *Sclerolobium* no gênero *Tachigali* resultou de análises filogenéticas e morfológicas que evidenciaram semelhanças estruturais significativas entre ambos. Assim, a espécie anteriormente denominada *Sclerolobium paniculatum* Vogel passou a ser considerada sinônimo de *Tachigali vulgaris* (Silva; Lima, 2007).

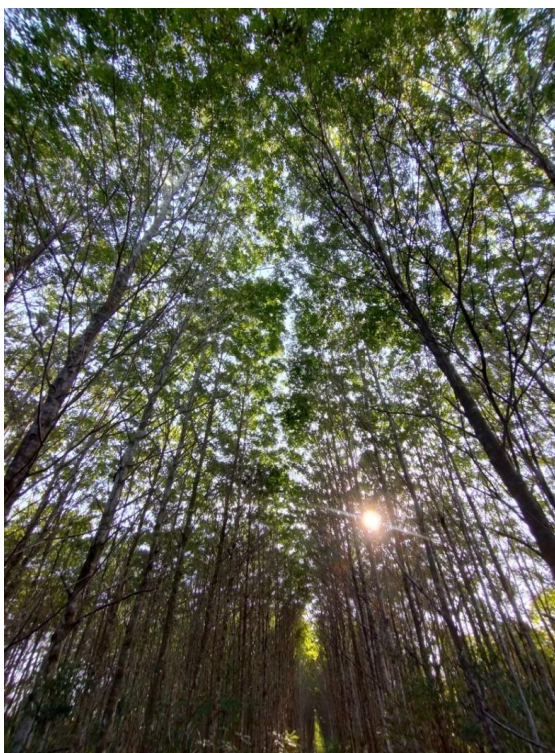


Figura 1. Plantação de *Tachigali vulgaris* na Fazenda escola de Igarapé-Açu, no município de Igarapé-Açu, Pará, Amazônia.

Fonte: Autor (2024).

Trata-se de uma espécie arbórea nativa da América do Sul, caracterizada por ampla distribuição geográfica e adaptação a variadas condições climáticas. No Brasil, sua ocorrência abrange todos os estados do bioma Amazônia, estendendo-se os estados do Piauí, Ceará, Bahia, Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso do Sul, São Paulo e o Distrito Federal. Além disso, já foi registrado sua presença em outros países inseridos na Amazônia geográfica, incluindo Peru, Suriname, Guianas e Venezuela (Sousa et al., 2016; Martorano et al., 2018).

A espécie demonstra significativa adaptabilidade a ambientes de solos pobres e ácidos, comuns na região Amazônica, e é caracterizada por alta produtividade e qualidade da madeira. Parâmetros como densidade básica, teores de lignina, carbono fixo, materiais voláteis e cinzas destacam seu potencial para a produção de biomassa energética (Barcellos et al., 2005). Sua elevada deposição foliar, desrama natural e alta produção de biomassa a tornam relevante na recuperação de áreas degradadas. Além disso, a espécie é bem adaptada a solos arenosos e latossolos argilosos antropizados (Silva et al., 2016).

Apresenta potencial para plantios comerciais devido ao seu rápido crescimento e à capacidade de estabelecer associações simbióticas com bactérias fixadoras de nitrogênio. Em experimentos realizados na região Amazônica, os diâmetros à altura do peito (DAP) variaram entre 11,77 cm e 14,04 cm em indivíduos com idades entre 8 e 10 anos (Teixeira et al., 2024). Em plantações experimentais de *Tachigali vulgaris*, foi registrado um incremento médio anual (IMA) de 14,7 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ aos 5 anos e de 21 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ aos 8 anos, com taxas de mortalidade entre 6% e 10%, respectivamente (Tonini et al., 2018). Em outro estudo realizado por Souza et al. (2008), o IMA foi de 43,2 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ aos 11 anos, em uma área experimental em Manaus, Amazonas.

A madeira de *T. vulgaris* apresenta de forma nítida distinção entre cerne e alburno, sendo o cerne uma coloração castanha, com odor característico, textura fina, grã irregular, brilho pouco contrastado, densidade moderada ($\pm 0,596$ g cm⁻³) e boa estabilidade dimensional (Rolim; Piotto, 2018). A madeira é o principal produto de comercialização, sendo amplamente utilizada para geração de energia em indústrias e comunidades tradicionais na Amazônia, sobretudo na forma de carvão vegetal e lenha (Stallbaun et al., 2016; Martorano et al., 2018). Historicamente, sua madeira tem sido recomendada para a produção de carvão, originando um de seus nomes populares, "carvoeiro" (Rolim; Piotto, 2018).

Em plantações florestais destinadas à produção de biomassa energética, o ciclo de corte de *T. vulgaris* varia de 5 a 10 anos, enquanto para a produção de madeira serrada, o período ideal de colheita situa-se entre 15 e 20 anos (Carvalho, 2005). Sua madeira possui ampla aplicabilidade, sendo empregada na produção de carvão vegetal de alta qualidade, na construção civil, na fabricação de mourões e esteios, como lenha e fonte de etanol, além de ser utilizada em projetos de silvicultura urbana (Carvalho, 2005; Pilon et al., 2012).

2.3 Efeitos da adubação no crescimento e na densidade básica da madeira de espécies nativas na Amazônia

Na região Amazônica, espécies florestais são frequentemente plantadas em solos ácidos, pobres em nutrientes e de baixa fertilidade, muitas vezes em áreas degradadas. Essas condições podem afetar tanto o crescimento das árvores quanto na qualidade da madeira (Teixeira et al., 2024). Nesse contexto, a adubação torna-se fundamental na sustentabilidade das plantações e na recuperação dessas áreas, influenciando diretamente a taxa de crescimento e na qualidade da madeira. Além disso, o manejo adequado dos nutrientes pode acelerar o incremento volumétrico das árvores e modificar a estrutura anatômica do lenho, impactando na qualidade da madeira para os diferentes usos (Epron et al., 2012; Castro et al., 2020).

A formulação inadequada ou a aplicação incorreta de fertilizantes podem causar desequilíbrios nutricionais que dificultam o desenvolvimento das espécies, especialmente devido à variabilidade apresentada dos solos na região Amazônica (Assis et al., 2018). A carência ou uso excesso de nutrientes podem interferir na relação entre crescimento primário e secundário, impactando a formação dos anéis de crescimento e, por consequência, a densidade básica da madeira. De acordo com Silva et al. (2019), o potássio (K) é um dos nutrientes mais influentes nesse processo, pois, além de regular o balanço hídrico das árvores, afeta a deposição de lignina e a espessura das paredes celulares do lenho.

A densidade básica da madeira é um parâmetro fundamental para diversas aplicações industriais, principalmente para a produção de madeira serrada, celulose e carvão vegetal. Em espécies nativas da Amazônia, a adubação pode influenciar esse atributo de diferentes formas. O fornecimento adequado de macronutrientes, como nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K), é essencial para garantir a qualidade da madeira. Dessa forma, a adoção de práticas silviculturais, como a adubação, exerce um impacto significativo nesse aspecto. Os autores Castro et al. (2020) e Silva et al. (2019) ressaltam que a fertilização pode ter efeitos positivos, quando realizada na dosagem correta, ou negativos, quando aplicada de forma incorreta, afetando diretamente a produtividade, as suas características, propriedades da biomassa e de seus produtos derivados. Portanto, são necessários estudos para definir a dosagem ideal conforme a finalidade da madeira.

O equilíbrio nutricional deve ser ajustado com precisão, levando em conta tanto a genética da espécie quanto as condições do solo, precipitação, umidade relativa e temperatura na região. A adubação mineral e orgânica pode aumentar a produtividade sem comprometer a qualidade da madeira, desde que seja baseada em recomendações técnicas específicas para cada espécie (Biagiotti et al., 2017). Para garantir a nutrição adequada das árvores, é essencial

equilibrar sua demanda nutricional, determinada geneticamente, com a oferta de nutrientes. A quantidade e as características dos adubos a serem aplicados devem considerar as exigências nutricionais da espécie, a fertilidade do solo, a interação dos fertilizantes com o solo, sua eficiência e os efeitos dessas interações (Ryan, 2010).

A formulação dos fertilizantes, especialmente na proporção de N-P-K, deve ser ajustada de acordo com o tipo de solo, a espécie cultivada e o estágio de crescimento da árvore (Benites et al., 2010; Melo et al., 2016). Além disso, a reposição dos nutrientes removidos durante a colheita da madeira é fundamental para assegurar a sustentabilidade da produtividade ao longo dos ciclos de manejo (Melo et al., 2016). Embora as espécies nativas da Amazônia sejam naturalmente adaptadas a solos de baixa fertilidade, a falta de diretrizes específicas sobre adubação ainda limita o potencial produtivo desses plantios. O manejo inadequado pode afetar tanto o crescimento quanto a qualidade do lenho, reduzindo o aproveitamento econômico da madeira e comprometendo a viabilidade da silvicultura dessas espécies (Lima, 2004; Oliveira; Vale; Melo, 2006). Dessa forma, é fundamental investir em pesquisas contínuas para desenvolver protocolos nutricionais mais eficientes, levando em conta a interação entre adubação, crescimento e densidade da madeira, a fim de otimizar a produção e valorizar o uso comercial das espécies nativas amazônicas.

2.4 Biomassa Florestal

As estimativas de biomassa florestal são realizadas para diversas finalidades, abrangendo desde a avaliação da viabilidade econômica e o uso da biomassa para a geração de energia até a gestão eficiente dos recursos florestais e a análise de riscos de incêndio em plantios, e entre outros aspectos (Ribeiro et al., 2009; Romero et al., 2024). No entanto, a produção de biomassa florestal é influenciada por diversos fatores, os quais podemos considerar como as características do sítio, o tipo de solo, a espécie cultivada, a idade e a densidade do povoamento, entre outros (Sette junior et al., 2012). No cenário mundial, o Brasil se destaca pelo cultivo de espécies florestais exóticas (Barbosa et al., 2023), sendo o gênero *Eucalyptus* a principal fonte de abastecimento de biomassa florestal (Protásio et al., 2021).

A literatura define a biomassa florestal como a quantidade total de matéria orgânica viva, presente tanto acima quanto abaixo do solo, expressa em quilograma ou megagrama de massa seco por unidade de área (Ribeiro et al., 2015). Outros autores como Sanquetta (2018), conceituam biomassa como toda a massa de origem biológica, viva, seja animal ou vegetal. No contexto da biomassa florestal, o autor a descreveu como toda a biomassa existente na floresta ou em sua fração arbórea, enquanto, para biomassa de origem vegetal, utilizou-se o termo

fitomassa. A determinação da biomassa e do carbono consiste em uma medição direta realizada em campo. Já a estimativa desses componentes é feita por meio de diferentes métodos baseados em relações quantitativas ou estatísticas, como razões, regressões e técnicas de ajustes (Sanquetta, 2018; Romero et al., 2020).

2.4.1 Métodos de amostragem aplicados na quantificação da biomassa

As estimativas de biomassa seca pode ser obtidas por dois métodos distintos: o direto e o indireto (Chaves et al., 2014; Sanquetta et al., 2016). O método direto é caracterizado pelo um alto custo e maior demanda de tempo para sua execução e medição (Chaves et al., 2009). Nesse processo, selecionam-se árvores representativas da população, realiza-se a amostragem destrutiva e, ainda no campo, registra-se o peso verde de cada componente (raízes, fuste, galhos grossos, finos e as folhas). Posteriormente, subamostras de cada componente são coletadas para análise laboratorial, permitindo a determinação do peso seco, teor de umidade, biomassa total e específica, entre outros parâmetros (Sanquetta et al., 2014).

Enquanto a estimativa de biomassa pelo método indireto, não destrutivo, pode ser realizada por diversas abordagens, utilizando dados do método direto ou do inventário florestal. Entre essas abordagens, podendo também ser utilizado o sensoriamento remoto, os fatores de expansão de biomassa, a densidade básica da madeira, a modelagem por modelos de regressão, redes neurais artificiais e entre outras (Ribeiro et al., 2009; Ribeiro et al., 2015).

No estudo da biomassa e do carbono, o método indireto baseia-se na utilização de dados do inventário florestal, como diâmetro à altura do peito, altura da árvore e densidade da madeira, para estimar as variáveis (Novais et al., 202a; Barros-junior et al., 2022; Chave et al., 2009). Os modelos empregados geralmente correlacionam a biomassa com essas variáveis, pois são de fácil obtenção e apresentam maior acurácia (Suwa et al., 2021; Silva et al., 2015).

Na literatura relata que a forma mais comum de estimar a biomassa florestal é por meio da aplicação de equações alométricas, e pela densidade básica da madeira. Simultaneamente, é possível determinar o estoque de carbono na biomassa. No entanto, para validar o modelo, é fundamental comparar as estimativas com os valores obtidos pela quantificação direta da biomassa realizada em campo (Romero et al., 2020).

No estudo de Sanquetta et al. (2018), foi identificado que as plantações florestais têm contribuído cada vez mais no estoque de carbono, devido à expansão da área plantada e ao crescimento da produtividade. O eucalipto foi a principal espécie responsável por esse aumento, passando de 58% para 71% do total estocado, enquanto o pinus teve sua participação reduzida por conta do menor crescimento da área cultivada. Em 2016, a biomassa acima do solo

representava 71% do carbono armazenado, a biomassa subterrânea 12% e a necromassa 5%. Ao longo de 26 anos, as plantações florestais brasileiras removeram 1669 Gt CO₂-e da atmosfera. Além disso, Lima et al. (2016) avaliaram modelos para estimar biomassa e carbono em um plantio homogêneo e identificaram os modelos de Curtis e Schumacher-Hall como os mais precisos.

2.5 Estoque de carbono em espécies nativas na Amazônia

2.5.1 Estimativa do estoque de carbono

O carbono, como um dos principais gases de efeito estufa, é sequestrado pelas árvores em sua biomassa, que inclui troncos, galhos e raízes (Ribeiro et al., 2023). Esse processo de armazenamento é crucial para evitar que o carbono seja liberado na atmosfera. Além disso, a utilização da madeira proveniente de florestas plantadas como fonte de energia renovável tem o potencial de substituir combustíveis fósseis, como carvão e petróleo (Cunha et al., 2021; Araujo et al., 2023; Barros et al., 2024). Embora a queima da biomassa florestal libere CO₂, a emissão líquida de carbono é substancialmente reduzida em comparação com a queima de combustíveis fósseis, uma vez que as árvores absorvem esse carbono durante o seu ciclo de crescimento (IBÁ, 2024).

Durante seu desenvolvimento, os plantios florestais fixam carbono e, ao longo do tempo, armazenam grandes quantidades desse elemento em suas estruturas (Carle; Holmgren, 2008; Gomes et al., 2021). Devido à sua alta capacidade de armazenar carbono, tanto na biomassa aérea quanto abaixo do solo, as florestas plantadas são reconhecidas como um dos meios mais eficazes para o sequestro e armazenamento de carbono (Morais, 2012; Battie-Laclau et al., 2016; Ribeiro et al., 2023).

Para uma estimativa precisa do estoque de carbono na biomassa florestal, é imprescindível a aplicação de métodos aprimorados e consistentes de mensuração da biomassa florestal (Poudel et al., 2015; Gomes et al., 2021). Essas estimativas são ferramentas essenciais para análises técnicas, planejamento de projetos e estudos de viabilidade, sendo particularmente relevantes para organizações que buscam participar do mercado de créditos de carbono e monitorar as variações em seus estoques atmosféricos (Ribeiro et al., 2009; Silva et al., 2015; Sanquetta et al., 2018). Conforme pelo Sistema Florestal Brasileiro (SFB, 2015), a biomassa aérea contém, em média, 50% de carbono. Contudo, Sanquetta (2014) argumenta que esse percentual pode ser uma estimativa imprecisa, uma vez que o conteúdo de carbono na biomassa florestal pode variar significativamente conforme a espécie do plantio.

No Brasil, o mais recente relatório da Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ, 2024) estimou que os plantios florestais e as áreas de conservação no Brasil armazenaram um total de 4,92 bilhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente (tCO₂eq). Esse estoque está distribuído entre 1,86 bilhão de toneladas em florestas produtivas e 3,06 bilhões de toneladas em florestas naturais destinadas à conservação. De acordo com dados da Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ, 2024), em 2022, a estimativa do estoque médio de carbono na biomassa das florestas plantadas foi de 182,59 tCO₂eq/ha. Esse estoque de carbono está diretamente relacionado aos ciclos renováveis dos plantios florestais, realizados sob manejo sustentável. Diante do compromisso global com a mitigação das mudanças climáticas, o setor de árvores cultivadas se consolida como um aliado estratégico na redução das emissões de gases de efeito estufa, contribuindo para uma economia de baixo carbono. O conceito de dióxido de carbono equivalente (CO₂eq), utilizado na análise dessas emissões, permite comparar diferentes gases de efeito estufa, ajustando-os conforme seu potencial de aquecimento global.

Referências

- AKHTARI, S.; SOWLATI, T.; SILLER-BENITEZ, D. G.; ROESER, D. Impact of inventory management on demand fulfilment, cost and emissio of forest-based biomass supply chains using simulation modelling. **Biosystem Engineering**, v. 178, p. 184–199, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.11.015>
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Mapa de classificação climática de Köppen para o Brasil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- ARAUJO, E. C. G.; SANQUETTA, C. R.; DALLA CORTE, A. P.; PELISSARI, A. L.; ORSO, G. A.; SILVA, T. C. Global review and state-of-the-art of biomass and carbon stock in the Amazon. **Journal of Environmental Management**, v. 331, p. 117251, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117251>
- ASSIS, C. O.; TRUGILHO, P. F.; GOULART, S. L.; ASSIS, M. R.; BIANCHI, M. L. Efeito da aplicação de nitrogênio na produção e qualidade da madeira e carvão vegetal de um híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. **Floresta e ambiente**, v. 1, n. 25, 2018. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.117914>
- BARBOSA, L. O.; SANTOS, J. A.; GONÇALVES, A. F. A.; CAMPOE, O. C.; SCOLFORO, J. R. S.; SCOLFORO, H. F. Competition in forest plantations: Empirical and process-based modelling in pine and eucalypt plantations. **Ecological Modelling**, v. 483, n. 1, p. 110410, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2023.110410>
- BARCELLOS, D. C.; COUTO, L. C.; MÜLER, M. D.; COUTO, L. O estado-da-arte da qualidade da madeira de eucalipto para a produção de energia: um enfoque nos tratamentos silviculturais. **Biomassa e Energia**, v. 2, n. 2 p. 141-158, 2005.

- BARROS, W. T.; BARRETO-GARCIA, P. A. B.; CONCEIÇÃO JÚNIOR, V.; PEREIRA, M. G.; MONROE, P. H. M.; SILVA, M. D. S.; NASCIMENTO, M. S.; MORAIS, J. L. Biomass production and nutritional efficiency in short rotation eucalypt clone plantations for energy in north-east Brazil. **Southern Forests: a Journal of Forest Science**, v. 86, n. 2, p. 102-114, 2024. <https://doi.org/10.2989/20702620.2024.2325998>
- BATISTA, A.; CALMON, M.; LUND, S.; ASSAD, L.; PONTES, C.; BIDERMAN, R. Investimento em Reflorestamento com Espécies Nativas e Sistema Agroflorestais no Brasil: Uma Avaliação Econômica. World Resources Institute, 2021
- BATTIE-LACLAU, P.; DELGADO-ROJAS, J. S.; CHRISTINA, M.; NOUVELLON, Y.; BOUILLET, J. P.; CASSIA PICCOLO, M.; MOREIRA, M. Z.; GONÇALVES, J. L. M.; ROUPSARD, O.; LACLAU, JEAN-PAUL. Potassium fertilization increases water-use efficiency for stem biomass production without affecting intrinsic water-use efficiency in *Eucalyptus grandis* plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 364, n. 1, p. 77-89, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.01.004>
- BIAGIOTTI, G.; VALERI, S. V.; CRUZ, M. C. P.; VASCONCELOS, R. T. Fertilização potássica na implantação de *Corymbia citriodora* (Hook.) K.D. Hill & L.A.S. Jonhson. **Scientia Forestalis**, v. 45, n. 113, p. 129-137, 2017.
- BINKLEY, D.; CAMPOE, O. C.; ALVARES, C. A.; CARNEIRO, R. L.; STAPE, J. L. Variation in whole-rotation yield among *Eucalyptus* genotypes in response to water and heat stresses: The TECHS project. **Forest Ecology and Management**, v. 462, p. 117953, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.117953>
- CARNEIRO, A. D. C. O.; VITAL, B. R.; FREDERICO, P. G. U.; FIGUEIRÓ, C. G.; FIALHO, L. F.; SILVA, C. M. S. Caracterização energética das madeiras de clones de *Eucalyptus* cultivados em diferentes localidades. **Brazilian Journal of Wood Science**, v. 8, n. 3, p. 127 - 135, 2017. <https://doi.org/10.12953/2177-6830/rcm.v8n3>
- CARVALHO, P. E. R. **Taxi-branco**. Colombo: Embrapa Florestas, 2005. 11 f. (EMBRAPA FLORESTAS. Circular técnica, 111).
- CHAVE, J.; COOMES, D.; JANSEN, S.; LEWIS, S. L.; SWENSON, N. G.; ZANN, A. E. Towards a worldwide wood economics spectrum. **Ecology Letters**, v. 12, n. 4, p. 351–366, 2009
- CHAVE, J.; REJOU-MECHAIN, M.; BURQUEZ, A.; CHIDUMAYO, E.; COLGAN, S. M.; DELITTI, B. C. W.; DUQUE, A.; EID, T.; FEARNSTIDE, M. P. Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical. **Global Change Biology**, v. 20, n. 10, p. 3177–3190. 2014.
- COSTA, J. M. F. N.; CARNEIRO, A. D. C. O.; CARVALHO, A. M. M. L.; JACOVINE, L. A. G.; VITAL, B. R.; ARAUJO, S. O.; CANAL, W. D. Influência da temperatura de pirólise nas emissões gasosas, rendimentos e densidade do carvão vegetal. **Revista Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**, v. 11, n. 1, 2020. <https://doi.org/10.12953/2177-6830/rcm.v11n1>
- CUNHA, T. Q. G.; SANTOS, A. C.; NOVAES, E.; HANSTED, A. L. S.; YAMAJI, F. M.; SETTE JR, C. R. Eucalyptus expansion in Brazil: Energy yield in new forest frontiers. **Biomass and Bioenergy**, v. 144, n. 1, p. 105900, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105900>

- CUNHA, T. Q. G.; SANTOS, A. C.; NOVAES, E.; HANSTED, A. L. S.; YAMAJI, F. M.; SETTE JR, C. R. Eucalyptus expansion in Brazil: Energy yield in new forest frontiers. **Biomass and Bioenergy**, v. 144, n. 1, p. 105900, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105900>
- DENICH, M.; KANASHIRO, M. A vegetação secundária na paisagem agrícola no Nordeste paraense, Brasil. In: **WORKSHOP INTERNACIONAL SANTARÉM, Pará, Anais**, v.1, n.1, p. 14-24, 1995.
- ELLEMBERG, H.; MUELLER-DOMBOIS, D. *Aims and methods of vegetation ecology*. New York: Jhohn Wiley & Sons, 1974. 547 p.
- ELLI, E. F.; SENTELHAS, P. C.; BENDER, F. D. Impacts and uncertainties of climate change projections on eucalyptus plantations productivity across Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 474, n. 1, p. 118365, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118365>.
- FARIAS, J. D.; MARIMON, B. S.; SILVA, L. D. C. R.; PETTER, F. A.; ANDRADE, F. R.; MORANDI, P. S.; MARIMON-JUNIOR, B. H. Survival and growth of native *Tachigali vulgaris* and exotic *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus grandis* trees in degraded soils with biochar amendment in southern Amazonia. **Forest Ecology and Management**, v. 368, n. 1, p. 173-182. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.03.022>
- FIGUEIREDO, E. O.; D'OLIVEIRA, M. V. N.; BRAZ, E. M.; ALMEIDA PAPA, D.; FEARNSIDE, P. M. LIDAR-based estimation of bole biomass for precision management of an Amazonian forest: Comparisons of ground-based and remotely sensed estimates. *Remote Sens. Environ.*, v.187, n. 1, p. 281–293, 2016.
- FLORÊNCIO, G. W. L.; MARTINS, F. B.; FAGUNDES, F. F. A. Climate change on Eucalyptus plantations and adaptive measures for sustainable forestry development across Brazil. **Industrial Crops and Products**, v. 188, p. 115538, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115538>
- GOMES, K. M. A.; BEZERRA, T. G.; SANTOS, L. E. D.; GAMA, J. R. V.; PROTÁSIO, T. D. P. Plantios abandonados de Hevea guianensis Aubl. E seu potencial para créditos de carbono na Floresta Nacional do Tapajós. **Revista Forestal Mesoamericana Kurú**, v. 18, n. 42, p. 1-7, 2021.
- GUIMARÃES, Z. T. M.; SANTOS, V. A. H. F.; NOGUEIRA, W. L. P.; MARTINS, N. O. A.; FERREIRA, M. J. Leaf traits explaining the growth of tree species planted in a Central Amazonian disturbed area. **Forest Ecology and Management**, v. 430, n. 1, p. 618-628, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.08.048>
- INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ. **Anuário estatístico do IBÁ**. Ano base 2023. Associação Brasileira de Árvores, p. 160, 2024.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br/>. Acesso em: 6 mar de 2024.
- KÖPPEN, W. *Climatologia: con um estúdio de los climas de la Tierra*. Mexico: Fondo de Cultura Economica, 1948. 478p.

- LIMA, R. M. B. **Crescimento do *Sclerolobium paniculatum* Vogel na Amazônia, em função de fatores de clima e solo.** 2004. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/220536/1/Revista-Floresta.pdf>.
- MARTINS, F. B.; BENASSI, R. B.; TORRES, R. R.; BRITO NETO, F. A. Impacts of 1.5 C and 2 C global warming on Eucalyptus plantations in South America. **Science of The Total Environment**, v. 825, p. 153820, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153820>
- MARTORANO, L. G.; TOURNE, D. C. M.; LISBOA, L. S.; SOUSA, V. G.; SANTOS, L. S.; BRIENZA JÚNIOR, S. **Zoneamento topoclimático do taxi-branco (*Tachigali vulgaris* L. F.) na Amazônia Legal: Estratégias de Planejamento com Metas de Desenvolvimento Sustentável.** Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2018. 70p. (Embrapa Amazônia Oriental. Documentos 435).
- MELO, E. A. S. C.; GONÇALVES, J. L. M.; ROCHA, J. H. T.; HAKAMADA, R. E.; BAZANI, J. H.; W. A. V. A.; ARTHUR JUNIOR, J. C.; BORGES, J. S.; MALHEIROS, R.; LEMOS, C. C. Z.; FERREIRA, E. V. O.; FERRAZ, A. V. Responses of clonal eucalypt plantations to N, P and K fertilizer application in different edaphoclimatic conditions. **Forests**, v. 7, n. 1, p. 1-10, 2016. <https://doi.org/10.3390/f7010002>
- OLIVEIRA, J. B.; VALE, A. T.; MELO, J. T. Caracterização mecânica e contração da madeira de *Sclerolobium paniculatum* Vogel cultivado em um plantio homogêneo sob diferentes níveis de adubação. **Ciência Florestal**, v. 16, n. 1, p. 89-97, 2006.
- ORELLANA, B. B. M.; VALE, A. T.; GONÇALEZ, J.; GUEDES, M. C.; ORELLANA, J. B. P.; LIMA, C. M. Produtividade energética da madeira de *Tachigali vulgaris* por classe diamétrica em plantios experimentais na Amazônia. **Nativa**, v. 6, p. 773-781, 2018. <https://doi.org/10.31413/nativa.v6i0.5130>
- PALHETA, L. F. **Crescimento vegetativo de *Tachigali vulgaris* LG Silva & HC Lima (tachi-branco) em resposta à adubação e condições climáticas no município de Igarapé-açu/Pa.** 2020. 69 f. Tese (Doutorado). Ciências Florestais, Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2020.
- PALHETA, L. F.; SIMÕES, P. H. O.; NEVES, R. L. P.; ATAIDE, W. L. S.; PAULA, M. T.; DORNELAS, K. C.; SANTIAGO, A. V.; CARVALHO, J. O. P. Influence of meteorological variables on the development in plantation of *Tachigali vulgaris* LG Silva & HC Lima (tachi-branco). **Italian Journal of Agrometeorology**, v. 1, p. 109-117, 2024.
- PILON, N. A. L.; MELO, A. C. G.; DURIGAN, G. Comparação de métodos para quebra de dormência das sementes de carvoeiro – *Tachigali vulgaris* L.F. Gomes da Silva e H.C. Lima (Família: Fabaceae – Caesalpinioideae). **Revista do Instituto Florestal**, v. 24, n. 1, p.133-138, 2012. Nota científica. <https://doi.org/10.24278/2178-5031.2012241385>
- PROTÁSIO T. P.; LIMA M. D. R.; SCATOLINO M. V.; SILVA, A. B.; FIGUEIREDO, I. C. R.; HEIN, P. R. G.; TRUGILHO, P. F. Charcoal productivity and quality parameters for reliable classification of *Eucalyptus* clones from Brazilian energy forests. **Renew Energy**, v. 164, n. 1, p. 34–45, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.09.057>
- RAIJ, B. V. Fertilidade do solo e adubação. **Piracicaba: Ceres**, v. 343, p. 596, 1991.
- RESQUIN, F.; DUQUE-LAZO, J.; ACOSTA-MUÑOZ, C.; RACHID-CASNATI, C.; CARRASCO-LETELIER, L.; NAVARRO-CERRILLO, R. M. Modelling current and future

- potential habitats for plantations of *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden and *E. dunnii* Maiden in Uruguay. **Forests** v. 11, n. 9, p. 948, 2020. <https://doi.org/10.3390/f11090948>
- RIBEIRO, S. C.; JACOVINEII, L. A. G.; SOARESII, C. P. B.; MARTINSII, S. V.; SOUZAI, A. L.; NARDELLI, A. M. B. Quantificação de biomassa e estimativa de estoque de carbono em uma floresta madura no município de Viçosa, Minas Gerais. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 33, n. 5, p. 917-926, 2009.
- RIBEIRO, S. C.; JACOVINEII, L. A. G.; SOARESII, C. P. B.; MARTINSII, S. V.; SOUZAI, A. L.; NARDELLI, A. M. B. Quantificação de biomassa e estimativa de estoque de carbono em uma floresta madura no município de Viçosa, Minas Gerais. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 33, n. 5, p. 917-926, 2009.
- RIBEIRO, S. C.; SOARES, C. P. B.; FEHRMANN, L.; JACOVINE, L. A. G.; VON GADOW, K. aboveground and belowground biomass and carbon estimates for clonal *Eucalyptus* trees in Southeast Brazil. **Revista Árvore**, v. 39, n. 2, p. 353-363, 2015. <https://doi.org/10.1590/0100-67622015000200015>
- RIBEIRO, S. C.; SOARES, C. P. B.; FEHRMANN, L.; JACOVINE, L. A. G.; VON GADOW, K. aboveground and belowground biomass and carbon estimates for clonal *Eucalyptus* trees in Southeast Brazil. **Revista Árvore**, v. 39, n. 2, p. 353-363, 2015. <https://doi.org/10.1590/0100-67622015000200015>
- RODRIGUES, R. P.; GONÇALVES, D. A.; SILVA, A. R.; MARTINS, W. B. R.; DIONISIO, L. F. S.; SCHWARTZ, G. Crescimento e mortalidade de *Tachigali vulgaris* L.G.Silva & H.C.Lima em diferentes espaçamentos de plantio para a produção de biomassa. **Scientia Forestalis**, v. 48, n. 128, 2020. <https://doi.org/10.18671/scifor.v48n128.01>
- ROLIM, S. G.; PIOTTO, D. *Silvicultura e Tecnologia de Espécies da Mata Atlântica*. Editora Rona. 2018. 160 p.
- ROMERO, F. M. B.; GONÇALVES, L. A.; RIBEIRO, S. C.; TORRES, C. M. M. E.; SILVA, L. F.; GASPAS, R. O.; ROCHA, S. J. S.; STAUDHAMMER, C. L.; FEARNSTIDE, P. M. Allometric equations for volume, biomass, and carbon in commercial stems harvested in a managed forest in the southwestern Amazon: A case study. **Forests**, v. 11, n. 8, p. 874, 2020. <https://doi.org/10.3390/f11080874>
- ROMERO, F. M. B.; NOVAIS, T. N. O.; JACOVINE, L. A. G.; BEZERRA, E. B.; LOPES, R. C. B.; HOLANDA, J. S.; REYNA, E. F.; FEARNSTIDE, P. M. Wood Basic Density in Large Trees: Impacts on Biomass Estimates in the Southwestern Brazilian Amazon. **Forests**, v. 15, n. 5, p. 734, 2024. <https://doi.org/10.3390/f15050734>
- ROUSSEAU, G. X.; SILVA, P. R. S.; CELENTANO, D.; CARVALHO, C. J. R. Macrofauna do solo em uma cronosequência de capoeiras, florestas e pastos no Centro de Endemismo Belém, Amazônia Oriental. **Acta Amazonica**, v.44, n.4, p.499-512, 2014. <https://doi.org/10.1590/1809-4392201303245>
- RYAN, M. G. Factors controlling *Eucalyptus* productivity: how water availability and stand structure alter production and carbon allocation. **Forest Ecology and Management**, v. 259, n. 9, p. 1695-1703, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.01.013>
- SANQUETTA, C. R.; BEHLING, A.; CORTE, A. D.; SIMON, A.; PSCHIEDT, H.; RUZA, M. S.; MOCHIUTTI, S. Estoques de biomassa e carbono em povoamentos de acácia negra

- em diferentes idades no Rio Grande do Sul. **Scientia Forestalis**, v. 42, n. 103, p. 361-370, 2014.
- SANQUETTA, C. R.; DALLA CORTE, A. P.; PELISSARI, A. L.; TOMÉ, M.; MAAS, G. C. B.; SANQUETTA, M. N. I. Dynamics of carbon and CO₂ removals by Brazilian forest plantations during 1990–2016. **Carbon balance and management**, v. 13, n. 1, p. 1-12, 2018. <https://doi.org/10.1186/s13021-018-0106-4>
- SANTOS, C. S.; MIRANDA, L. C.; BORDALO, C. A. L. Conflitos de Uso do Solo em Áreas de Preservação Permanente na Bacia Hidrográfica do Rio Igarapé-Açu-Pa. **Revista Equador**, v. 8, n. 2, p. 30-46, 2019.
- SETTE JR, C. R.; OLIVEIRA, I. R. D.; TOMAZELLO FILHO, M.; YAMAJI, F. M.; LACLAU, J. P. Efeito da idade e posição de amostragem na densidade e características anatômicas da madeira de *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, v. 36, p. 1183-1190, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622012000600019>
- SILVA, A. R.; GONÇALVES, A.; SALES, A. Desempenho do tachi-branco em resposta à adubação combinada de fósforo e potássio em Latossolos. **Acta Iguazu**, v.5, n.2, p. 37-48, 2016. <https://doi.org/10.48075/actaiguaz.v5i2.15277>
- SILVA, B. N. R. Solos da área do Programa Grane Carajás. 1982. Embrapa Amazônia Oriental. **Documentos**, 11, 1982.
- SILVA, C. A.; KLAUBERG, C.; CARVALHO, S. D. P. C.; PICCOLO, M. D. C.; RODRIGUEZ, L. C. E. Estoque de carbono na biomassa aérea florestal em plantações comerciais de *Eucalyptus* spp. **Scientia Forestalis**, v. 43, n. 105, p. 135-146, 2015.
- SILVA, L. F. G.; DE LIMA, H. C. Nomenclatural changes in the genus *Tachigali* Aubl.(Leguminosae - Caesalpinioideae) in Brazil. **Rodriguesia**, v. 58, n. 2, p. 397–491, 2007.
- SILVA, R. T.; SETTE JÚNIOR, C. R.; FRANCO, M. P.; TOMAZELLO FILHO, M.; LACLAU, J. P.; CHAIX, G. Disponibilidade hídrica e fertilização mineral nas características da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden. **Ciência Florestal**, v. 29, n. 3, p. 1168-1179, 2019. <https://doi.org/10.5902/1980509831387>
- SIMÕES, P. H. O.; DE PAULA, M. T.; ARAÚJO, D. G.; SOUZA, L. C.; LIMA, C. C.; PALHETA, L. F.; OLIVEIRA NETO, C. F.; CARVALHO, J. O. P. Biological use coefficient of biomass of *Tachigali vulgaris* under phosphorus and potassium fertilization: Management technologies for sustainable production of bioenergy in tropical countries. **Australian Journal of Crop Science**, v. 16, n. 5, p. 637-648, 2022. <https://search.informit.org/doi/10.3316/informit.636571162501463>
- SOUSA, V. G.; BRIENZA JÚNIOR S.; BARBOSA, M. G.; MARTORANO, L. G.; SILVA, V. C. **Taxi-branco (*Tachigali vulgaris* L.F. Gomes da Silva & H.C. Lima):** botânica, ecologia e silvicultura. Documentos Embrapa, 426, 37 p, 2016.
- SOUSA, V. G.; BRIENZA JUNIOR, S.; BARBOSA, M. G.; MARTORANO, L. G.; SILVA, V. C. **Taxi-branco (*Tachigali vulgaris* L. F. Gomes da Silva & H. C. Lima):** botânica, ecologia e silvicultura. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2016, 37 p. (Embrapa Amazônia Oriental. Documentos 426).

- STALLBAUN, P. H.; BARAÚNA, E. E. P.; MONTEIRO, T. C.; VIEIRA, R. D. S.; SALES, N.; OLIVEIRA, L. S. Natural resistance of *Tachigali vulgaris* wood bywood-destroying fungi *Postia placenta*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 36, n. 88, p. 459-463, 2016. <http://pfb.cnpf.embrapa.br/pfb/index.php/pfb/article/view/1231/539>
- STALLBAUN, P. H.; BARAUNA, E. E. P.; PAES, J. B.; RIBEIRO, N. C.; MONTEIRO, T. C.; ARANTES, M. D. C. Natural resistance of *Sclerolobium paniculatum* Vogel wood to termites in laboratory conditions. **Floresta e Ambiente**. v.24, p.20160013, 2017.
- TEIXEIRA, R. A. C.; LIMA, M. D. R.; SILVA, A. R.; GONÇALVES, D. D. A.; MOREIRA, L. J. D. S.; MIRANDA, R. O. V.; PROTÁSIO, T. D. P. Dynamics of experimental plantations of *Tachigali vulgaris* in response to fertilization and soil texture. **New Forests**, v. 55, n. 4, p. 713-733, 2024. <https://doi.org/10.1007/s11056-023-09999-1>
- TONINI, H.; SCHWENGBER, D. R.; MORALES, M. M.; OLIVEIRA, J. M. F. Crescimento e qualidade energética da madeira de *Tachigali vulgaris* em diferentes espaçamentos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 38, p. 1-8, 2018. <https://doi.org/10.4336/2018.pfb.38e201801569>
- WATRIN, O. S.; GERHARD, P.; MACIEL, M. Dinâmica do uso da terra e configuração da paisagem em antigas áreas de colonização de base econômica familiar, no Nordeste do estado do Pará. **Geografia**, v. 34, n. 3, p. 455-472, 2009.

3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

3.1 Descrição da área de estudo

3.1.1 Localização

A pesquisa foi conduzida em estação experimental pertencente à Universidade Federal Rural da Amazônia, localizada no município de Igarapé-Açu, Pará, localizada entre as coordenadas geográficas 01°07'33" de latitude Sul e 47°37'27" de longitude a Oeste de Greenwich, região nordeste do estado.

3.1.2 Clima

O clima predominante na região é do tipo Am (Alvares et al., 2013), de acordo com a classificação de Koppen, caracterizado como tropical úmido ou subúmido. O município de Igarapé-Açu não possui estação meteorológica própria. Por esse motivo, os dados apresentados no climograma (Figura 2) correspondem aos da estação mais próxima, localizada no município de Castanhal. Os valores referem-se ao período definido desde a implantação do plantio até a coleta de dados (2016 – 2024). As temperaturas mínimas e máximas oscilam entre 21,4 °C e 32,2 °C, respectivamente. A umidade relativa média foi de 85%, a precipitação média anual de 2.500 mm, concentrada em maior quantidade nos meses de janeiro a junho, sendo os meses de julho a dezembro os menos chuvosos.

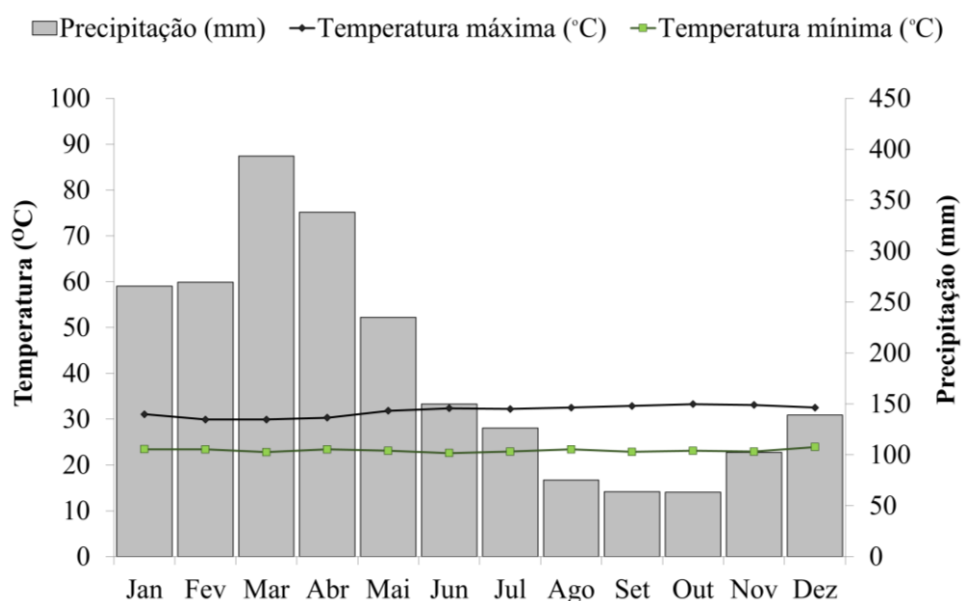


Figura 2. Pluviosidade mensal (mm), temperaturas do ar (°C) máximas e mínimas mensais para o período de 2016 à 2024, Igarapé-Açu, Pará, Brasil.

Fonte: Autor (2024).

3.1.3 Topografia e Hidrografia

A topografia da região apresenta níveis baixos em relação à sua altimetria com variações de aproximadamente 5 a 46 metros nas áreas mais elevadas (Santos et al., 2019). Formada por aproximadamente 85% de área plana, 10% ondulado e 5% em região de planície de inundação (várzea). O relevo está inserido na unidade morfoestrutural denominada de Planalto Rebaixado da Amazônia (Watrin et al., 2009).

3.1.4 Geologia e solos

Os solos predominantes na região do município são classificados como Latossolo amarelo e concrecionários lateríticos nas áreas de terra-firme (Rousseau et al., 2014). O Latossolo é um solo mineral de textura média a muito argilosa, não hidromórficos, de baixa fertilidade natural, profundos a muito profundos e são geralmente bem drenados (Rousseau et al., 2014). O concrecionário laterítico é um solo que engloba horizonte B textural como B latossólico. São mediantemente profundos, formados por concreções de vários diâmetros, normalmente apresenta o maior volume da massa do solo (Silva, 1982).

3.1.5 Tipologia florestal

A classificação fitogeográfica adotada na cartografia oficial do Brasil é baseada nos estudos de Ellemberg e Muller-Dombois (1974). A vegetação primária da Zona Bragantina, onde se localiza a área de estudo é encontrada em poucas áreas da região. Isso acontece devido ao desenvolvimento demográfico, agrícola e a pecuária no município de Igarapé-Açu, onde a vegetação predominante é classificada como floresta secundária (Denichl; Kanashiro, 1995).

3.2 Descrição do plantio

3.2.1 Projeto de pesquisa

Esta pesquisa foi desenvolvida em um plantio de *Tachigali vulgaris*, o qual provém de um projeto que se encontra concluído, denominado “Desempenho do crescimento vegetativo de tachi-branco em resposta a adubação de nutrientes, em ambientes de viveiro e de campo” seus idealizadores e coordenadores são: Prof. Dr. Rodrigo Silva do Vale, Prof. Dr. Pedro Henrique Oliveira Simões, Prof. Dr. Paulo de Tarso Eremita da Silva e o Dr. Lenilson Ferreira Palheta, financiados pela Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisas do Pará. O projeto consistiu em contribuir com informações sobre o desempenho vegetativo da espécie em ambiente de viveiro e campo, sob diferentes níveis de adubação, gerando informações

importantes para o conhecimento na silvicultura da espécie e que possa incentivar o plantio para fins energéticos na região Amazônica.

3.2.2 Procedimentos da implantação

A área experimental possui um histórico de criação de gado. Posteriormente, foi convertida em um plantio de *Inga* sp., que acabou sendo abandonado e permaneceu em pousio por vários anos. Durante esse período, a vegetação de pasto se estabeleceu no local, sendo posteriormente suprimida para a implantação do povoamento.

Inicialmente, foram obtidas sementes de *T. vulgaris* utilizadas na produção de mudas em viveiro, provenientes de um produtor certificado. As sementes foram colhidas de matrizes localizadas no município de Santarém-PA (2° 26' 22"S; 54° 11' 55"W) (Simões et al., 2022). Por apresentarem dormência tegumentar, foi necessário aplicar um tratamento pré-germinativo para promover, acelerar e uniformizar a germinação (Palheta et al., 2024).

Para superar a dormência, foi realizada a remoção de uma pequena porção do tegumento na extremidade oposta ao eixo embrionário (desponte), facilitando o processo de embebição e, conseqüentemente, o início da germinação. Após esse processo, as sementes foram colocadas em sementeiras contendo areia lavada como substrato. Decorridos 30 dias do início da germinação, as mudas foram transplantadas para sacos de 15 cm x 25 cm, com volume de 1,9 dm³ de solo. Após um período de 8 meses, quando as mudas atingiram 40 cm de altura e estavam aptas ao plantio, foram transplantadas para a área experimental (Palheta et al., 2024).

Para subsidiar as recomendações de adubação, foi realizada a caracterização físico-química do solo. O solo foi coletado antes do plantio, por meio de caminhamento em ziguezague pela área, utilizando um trado holandês para amostragem em cinco pontos, nas profundidades de 0–20 cm e 20–40 cm (Palheta et al., 2020).

Após a coleta, as amostras foram homogeneizadas para formar uma amostra composta correspondente a cada profundidade. Posteriormente, foram secas em estufa com circulação de ar forçada a 60 °C por 48 horas, moídas e enviadas ao laboratório do Instituto Brasileiro de Análises (IBRA), onde foram submetidas a análises químicas e físicas (Tabela 1 e Tabela 2) (Palheta et al., 2020).

Tabela 1. Caracterização química do solo da área experimental do plantio, no município de Igarapé-Açu, Pará, Brasil.

Profundidade (cm)	P mg dm ⁻³	MO g dm ⁻³	PH CaCl ₂	K	Ca	Mg	H+Al	Al	SB	T	V %	m %
0 - 20	2,3	18	4,3	0,4	5	1	38	5	6,9	44,9	15	42
20 - 40	2,4	15	4,3	0,4	4	1	38	7	6,1	36,1	17	53,4

Fonte: Palheta (2020).

Tabela 2. Caracterização física do solo da área experimental do plantio, no município de Igarapé-Açu, Pará, Brasil.

	Argila	Silte	Areia total	Silte + Argila
Profundidade (cm)	HMFS + NaOH g.kg ⁻¹	HMFS + NaOH g.kg ⁻¹	HMFS + NaOH g.kg ⁻¹	HMFS + NaOH g.kg ⁻¹
0 - 20	184	90	726	274
20 - 40	225	111	664	336

Fonte: Palheta (2020).

As atividades silviculturais consistiram em: limpeza da área com trator/roçadeira para supressão da pastagem e grade-aradora para descompactação do solo; abertura de sulcos nas linhas de plantio utilizando trator com aiveca e aplicação de 100 g de NPK na formulação comercial de 9-28-20. Embora os níveis de acidez (Tabela 1) fossem considerados altos (RAIJ, 1991), optou-se pela não correção do solo com calcário, devido ao encarecimento dos custos do plantio (Palheta, 2020).

O plantio experimental (Figura 3) foi instalado em fevereiro de 2016, com espaçamento de 2 m x 3 m (árvores x linhas), de acordo com o recomendado por Souza et al. (2016), totalizando 1.728 árvores, em uma área de 1,44 hectares.

Observou-se durante o primeiro ano do plantio a ocorrência do ataque de um tipo de lagarta de ocorrência na região, no entanto, não foi possível realizar a identificação da mesma, contudo foi controlada com a aplicação de inseticida.



Figura 3. Plantio experimental de *Tachigali vulgaris* no município de Igarapé-Açu, Pará, Brasil.
Fonte: Autor (2024).

3.2.3 Tratamentos

Os tratamentos consistiram na combinação de doses de fertilizantes (fatores), sendo eles o nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) em 3 diferentes níveis de dosagens de cada fator. Os respectivos produtos comerciais utilizados estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Nutrientes com suas respectivas fontes (produto comercial).

Nutrientes	Fonte
N	Ureia: $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$
K_2O	Super fosfato triplo: $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2\text{H}_2\text{O}$
P_2O_5	Cloreto de potássio: KCl

Fonte: Do Vale (2016).

Foram avaliadas as respostas da espécie *T. vulgaris* à adubação com fósforo (P), nitrogênio (N) e potássio (K), em esquema fatorial. Os tratamentos foram divididos em três níveis de P (0; 65,22; 130,43 Kg ha⁻¹), N (0; 88,89; 177,78 Kg ha⁻¹) e K (0; 100; 200 Kg ha⁻¹), totalizando 27 tratamentos (Tabela 4).

Tabela 4. Adubação e dosagem (kg ha⁻¹) nos diferentes tratamentos.

Tratamento	Siglas	Nitrogênio	Fósforo	Potássio	Total
		N (kg ha ⁻¹)	P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)	K ₂ O (kg ha ⁻¹)	
1	N ₁ P ₁ K ₁	0	0	0	0
2	N ₁ P ₁ K ₂	0	0	100	100
3	N ₁ P ₁ K ₃	0	0	200	200
4	N ₁ P ₂ K ₁	0	65,22	0	65,22
5	N ₁ P ₂ K ₂	0	65,22	100	165,22
6	N ₁ P ₂ K ₃	0	65,22	200	265,22
7	N ₁ P ₃ K ₁	0	130,43	0	130,43
8	N ₁ P ₃ K ₂	0	130,43	100	230,43
9	N ₁ P ₃ K ₃	0	130,43	200	330,43
10	N ₂ P ₁ K ₁	88,89	0	0	88,89
11	N ₂ P ₁ K ₂	88,89	0	100	188,89
12	N ₂ P ₁ K ₃	88,89	0	200	288,89
13	N ₂ P ₂ K ₁	88,89	65,22	0	154,11
14	N ₂ P ₂ K ₂	88,89	65,22	100	254,11
15	N ₂ P ₂ K ₃	88,89	65,22	200	354,11
16	N ₂ P ₃ K ₁	88,89	130,43	0	219,32
17	N ₂ P ₃ K ₂	88,89	130,43	100	319,32
18	N ₂ P ₃ K ₃	88,89	130,43	200	419,32
19	N ₃ P ₁ K ₁	177,78	0	0	177,78
20	N ₃ P ₁ K ₂	177,78	0	100	277,78
21	N ₃ P ₁ K ₃	177,78	0	200	377,78
22	N ₃ P ₂ K ₁	177,78	65,22	0	243
23	N ₃ P ₂ K ₂	177,78	65,22	100	343
24	N ₃ P ₂ K ₃	177,78	65,22	200	443
25	N ₃ P ₃ K ₁	177,78	130,43	0	308,21
26	N ₃ P ₃ K ₂	177,78	130,43	100	408,21
27	N ₃ P ₃ K ₃	177,78	130,43	200	508,21

Fonte: Do vale (2016)

A adubação foi aplicada a uma distância de 10 cm do limite da cova principal. Foram estabelecidos 4 blocos distanciados em 5 m, com 4 linhas de plantio dispostas no sentido Leste-Oeste. Esta medida foi tomada para facilitar a implantação de experimentos futuros, com utilização de fertilizantes aplicados na superfície do solo, evitando assim a contaminação entre os tratamentos por carreamento de chuvas. Onde cada tratamento representa uma parcela com 16 plantas, e cada bloco apresenta os 27 tratamentos organizados de forma sistemática (Figura 4).

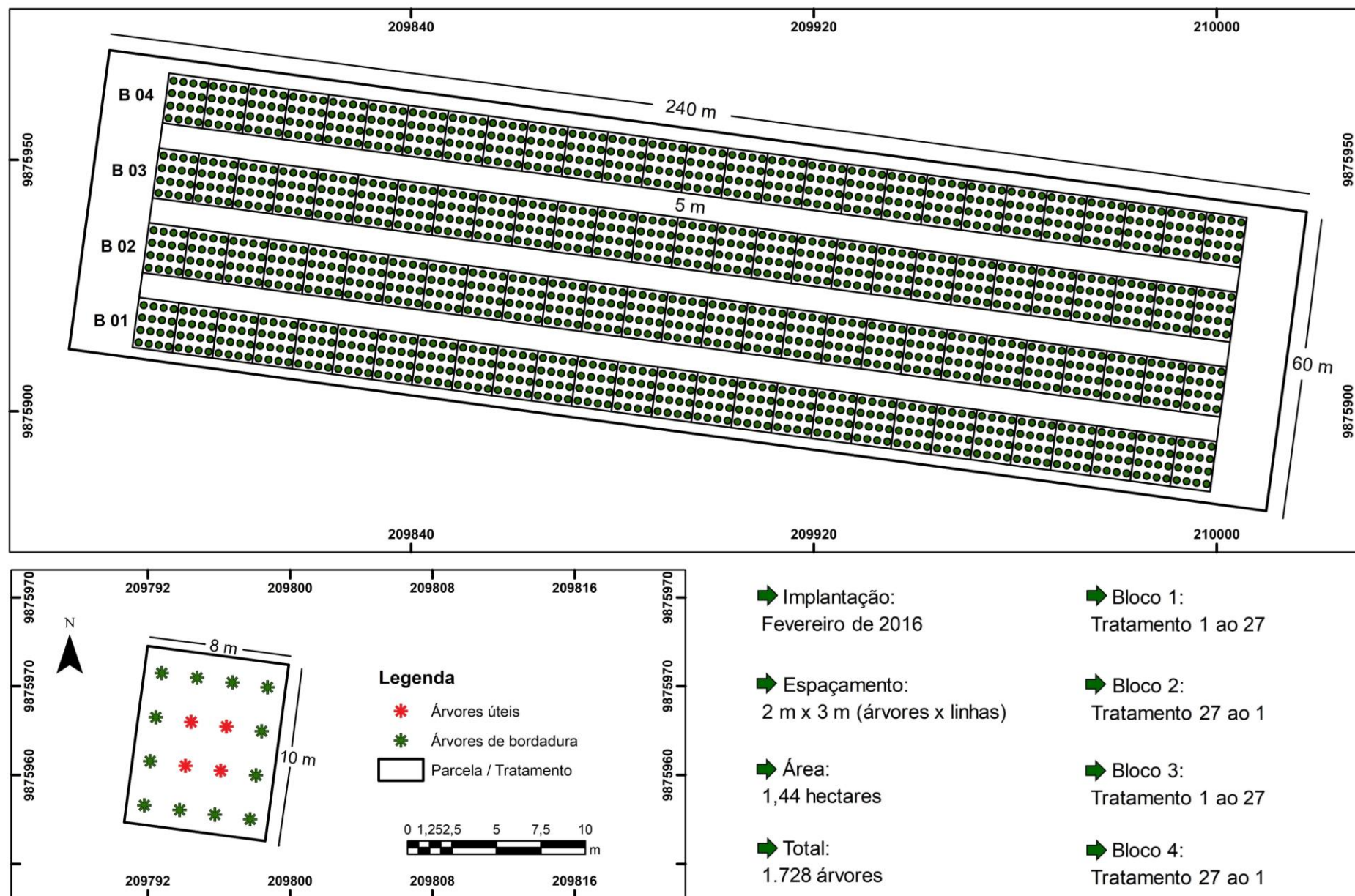


Figura 4. Croqui do plantio de *Tachigali vulgaris*, localizado na Fazenda escola de Igarapé-Açu, pertencente à Universidade Federal Rural da Amazônia, no município de Igarapé-Açu, Pará, Brasil.

Fonte: Autor (2024).

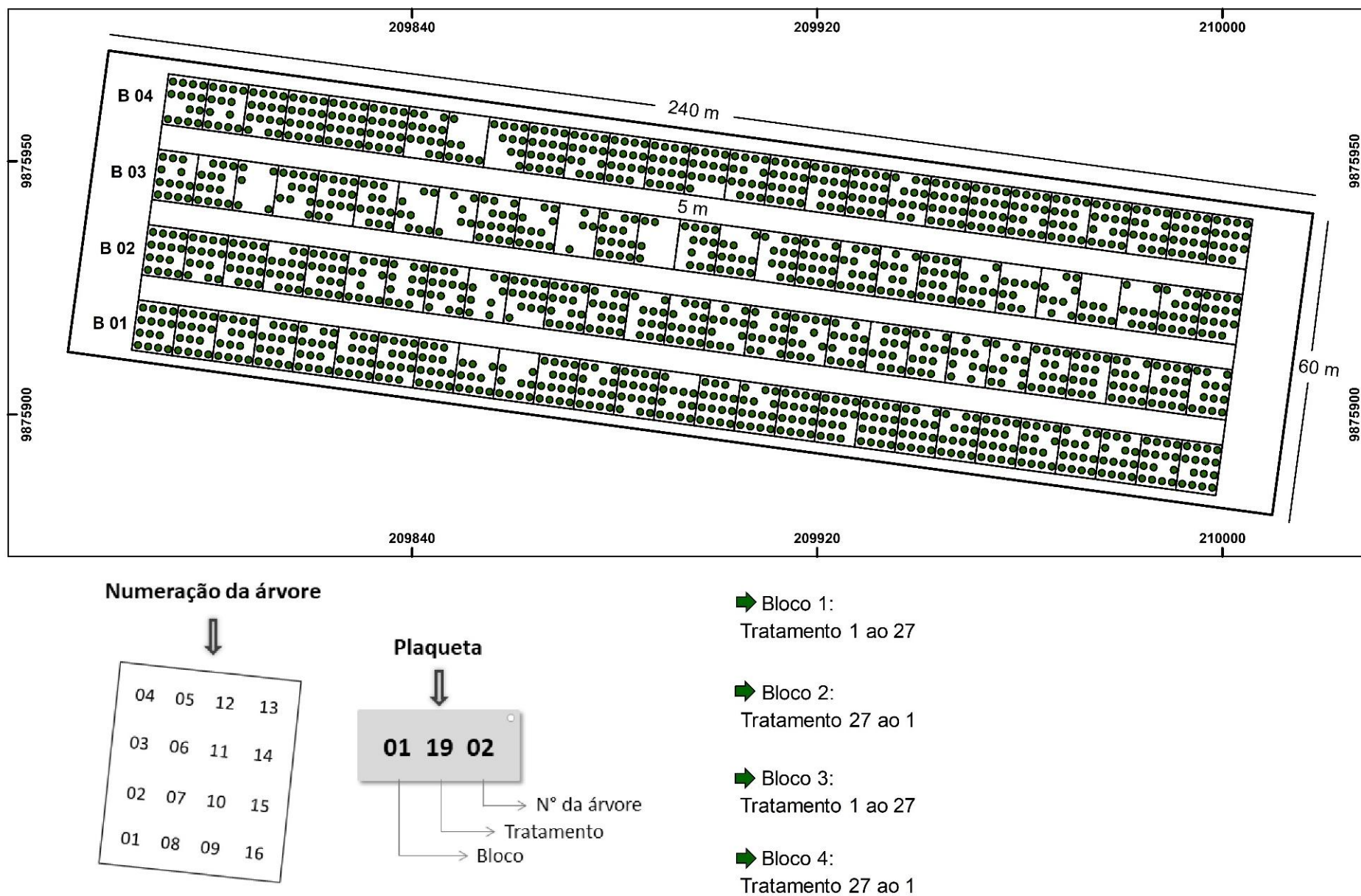


Figura 5. Croqui após a revitalização do plantio de *Tachigali vulgaris*, localizado na Fazenda escola de Igarapé-Açu, pertencente à Universidade Federal Rural da Amazônia, no município de Igarapé-Açu, Pará, Brasil.

Fonte: Autor (2024).

3.2.4 Histórico de atividades realizadas

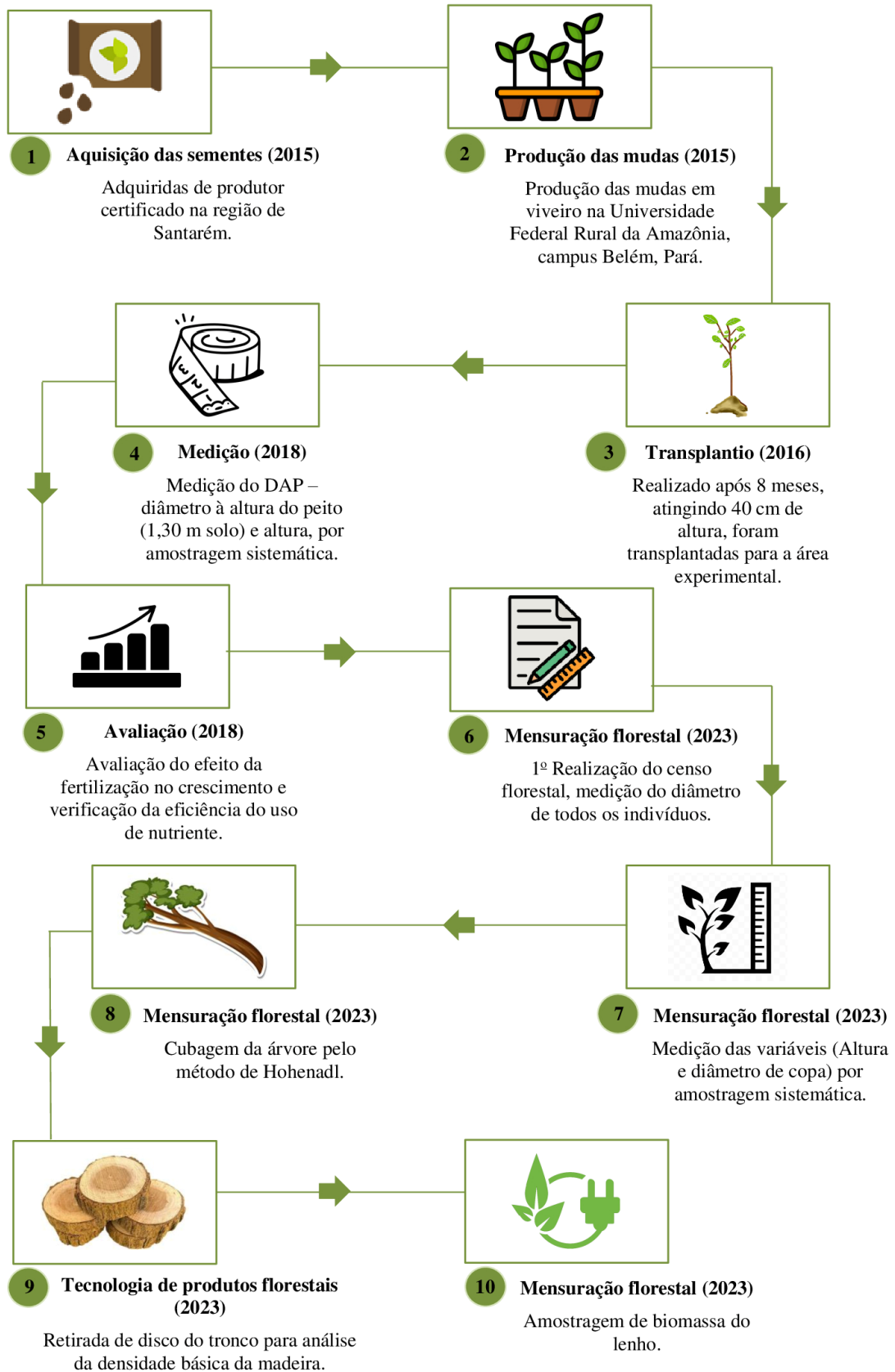


Figura 6. Fluxograma de atividades referente ao plantio de *Tachigali vulgaris*, no município de Igarapé-Açu, Pará, Brasil.

Fonte: Autor (2024).

ESTIMATIVA DE BIOMASSA E ESTOQUE DE CARBONO EM UM PLANTIO EXPERIMENTAL DE *Tachigali vulgaris* NA AMAZÔNIA

Leandro Nascimento Santos^{1*}, Rodrigo Silva do Vale¹, Pedro Henrique Oliveira Simões²,
Ximena Mendes de Oliveira¹, Rodrigo Geroni Mendes Nascimento¹, Thiago de Paula
Protásio³

¹Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA, CEP: 66077-830, Belém, Pará, Brasil

²Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais, Universidade Federal do Mato Grosso – UFMT, CEP: 78060-900, Cuiabá, Mato Grosso, Brasil

³Departamento de Ciências Florestais, Universidade Federal de Lavras – UFLA, CEP: 37203-202, Lavras, Minas Gerais, Brasil

* Autor correspondente

Endereço de e-mail: leandro12.ufra@gmail.com

ORCID: 0000-0003-2969-4395

Resumo: As florestas plantadas desempenham papel essencial na mitigação das mudanças climáticas ao promover o uso sustentável da biomassa lenhosa para geração de energia e contribuir significativamente para o sequestro de carbono. Nesse contexto, *Tachigali vulgaris*, espécie nativa da Amazônia, destaca-se pelo seu alto potencial na produção de biomassa, devido ao seu rápido crescimento e adaptação às condições ambientais da região. Este estudo teve como objetivo quantificar a biomassa e o estoque de carbono de um plantio experimental de *T. vulgaris*, que foi conduzido em uma área de 1,44 hectares, localizado no município de Igarapé-Açu, Pará, Brasil. O experimento foi instalado em 2016, em delineamento casualizado com quatro blocos, em esquema fatorial, considerando três níveis de fósforo, nitrogênio e potássio, totalizando 27 tratamentos por bloco. As 40 árvores cubadas pelo método de Hohenadl, aos 93 meses de idade, foram selecionadas com base na distribuição diamétrica. Foram avaliados o diâmetro à altura do peito (DAP), altura total (m) e volume total (m³). Além disso, amostras de seções transversais do tronco foram coletadas em diferentes alturas para determinar a densidade básica da madeira e, posteriormente, estimar a biomassa e o estoque de carbono. Aos 93 meses de idade, as árvores apresentaram volumes variando de 0,0138 a 0,4651 m³, com incremento médio anual (IMA) sem casca de 28,4 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ e com casca de 31,3 m³ ha⁻¹ ano⁻¹. As densidades básicas observadas foram de 0,358 g cm⁻³ a 0,584 g cm⁻³. Os valores de biomassa seca e estoque de carbono variaram de 559,03 a 67106,27 kg ha⁻¹ e de 278,40 a 33418,92 kg ha⁻¹, respectivamente. Esses dados fornecem suporte para pesquisas futuras sobre a espécie, com implicações para o manejo sustentável e recuperação de áreas degradadas na Amazônia. Palavras-chave: Amazônia, plantações florestais, Tachi-branco, crescimento florestal, produção de biomassa, sequestro de carbono.

1 Introdução

Em 2023, florestas plantadas no Brasil atingiram a marca histórica de 10,23 milhões de hectares, apresentando crescimento contínuo de 0,3% em relação ao ano anterior (IBÁ 2024). Esse avanço reflete a crescente demanda mundial por produtos derivados de madeira, como

celulose, papel, carvão vegetal, móveis e pisos laminados, destacando a importância estratégica desse setor para a economia nacional (Cunha et al. 2021; Florêncio et al. 2022). Do total de áreas plantadas, aproximadamente 9,75 milhões de hectares são ocupados pelas espécies de *Eucalyptus* e *Pinus*, com destaque para as regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste, que concentram a maior parte desses plantios. Por outro lado, a região Norte ainda possui uma área limitada de florestas plantadas, totalizando aproximadamente 438,47 mil hectares, o que corresponde a 4,29% da área total de florestas plantadas do país (IBÁ 2024).

A expansão contínua de florestas plantadas em regiões tropicais tem sido amplamente impulsionada por avanços científicos em melhoramento genético, práticas silviculturais, gestão de sítios, fertilização do solo e controle de pragas. No entanto, espécies florestais enfrentam efeitos adversos das condições ambientais (Resquin et al. 2020; Elli et al. 2020). Entre os fatores mais críticos destacam-se a escassez de água e as secas prolongadas (Câmara et al. 2020; Elli et al. 2020), além do aumento das temperaturas (Martins et al. 2022). Tais condições causam mudanças significativas nas estruturas fisiológicas e anatômicas das árvores, resultando em declínio da produtividade e aumento da mortalidade (Bahuguna e Jagadish 2015; Fagundes et al. 2021).

No entanto, a deterioração ambiental na Amazônia atingiu níveis críticos, influenciada principalmente pelo desmatamento e incêndios florestais que intensificam as mudanças climáticas (Marengo et al. 2018; Fearnside 2021). Essas transições críticas no ecossistema da floresta amazônica podem levar a um “ponto de inflexão” (Flores et al. 2024), resultando em consequências ambientais, sociais e econômicas devastadoras. Além disso, o impacto das mudanças climáticas sobre espécies exóticas tem afetado sua produtividade. Nesse contexto, a diversificação de espécies surge como uma estratégia promissora, com potencial significativo para mitigar os efeitos dessas perturbações, além de contribuir para a expansão da oferta de matérias-primas para diversos setores industriais locais e regionais da Amazônia (Guimarães et al. 2018; Teixeira et al. 2024).

A utilização de espécies nativas em plantações florestais pode trazer benefícios, como: (I) o equilíbrio entre produção e conservação em florestas tropicais (Pryde et al. 2015); (II) adaptabilidade ao meio ambiente (Moraes et al. 2023); e (III) contribui para reduzir a pressão sobre as florestas nativas e os efeitos das alterações climáticas (Teixeira et al. 2024). A espécie nativa da Amazônia que tem se mostrado promissora para uso em plantações florestais, principalmente para fins energéticos, é a *Tachigali vulgaris* L.G.Silva & H.C. Lima (Fabaceae), classificada como pioneira (Stallbaun et al. 2017) e popularmente chamada de “tachi-branco” ou “carvoeiro”. Esta espécie tem se mostrado adequada para pequenos produtores locais e

plantações de menor escala (Orellana et al. 2018; Guimarães et al. 2018; Lima et al. 2023). Além disso, apresenta características favoráveis para fins energéticos, recuperação de áreas degradadas e sequestro de carbono, indicando alta produtividade com 25,2 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ e densidade básica da madeira variando de 0,419 a 0,606 g cm⁻³ (Silva et al. 2021; Lima et al. 2023; Teixeira et al. 2024).

A avaliação deste potencial produtivo, incluindo aspectos como a produção de biomassa, é essencial para a gestão florestal, pois fornece dados fundamentais para a gestão sustentável dos recursos renováveis (Ribeiro et al. 2015). Nesse sentido, torna-se essencial compreender o papel das florestas plantadas não apenas na geração de biomassa, mas como sumidouros de carbono, com ênfase nos benefícios ambientais significativos, como a mitigação dos efeitos das mudanças climáticas, além dos impactos econômicos associados (Romero et al. 2024).

Medir a biomassa é uma prática essencial para estimar a quantidade de carbono armazenado nos vários componentes da árvore, permitindo assim o monitoramento das emissões de carbono associadas ao manejo florestal e outros processos ecológicos. Durante seu ciclo de vida, as florestas capturam e armazenam carbono em suas raízes, troncos, galhos e folhas, ao mesmo tempo em que contribuem para a qualidade do ar ao liberar oxigênio (Rawat et al. 2019; Ribeiro et al. 2023).

Apesar da crescente expansão das florestas plantadas no Brasil e dos estudos que visam quantificar a biomassa e o carbono florestal e seus fatores de influência (Ortega Rodriguez and Tomazello-Filho 2019; Barros et al. 2024). Na Amazônia, esses estudos ainda são escassos. Dessa forma, este estudo busca quantificar e avaliar a variabilidade dos estoques de biomassa e carbono em plantios experimentais de *Tachigali vulgaris* na Amazônia, além de verificar os principais fatores que influenciaram os resultados, e que podem auxiliar na compreensão do papel das florestas plantadas nesse tema.

2 Material e métodos

Descrição da área de estudo

O estudo foi conduzido em um plantio experimental de *Tachigali vulgaris* em uma área de 1,44 hectares, localizado na estação de pesquisa pertencente à Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), no município de Igarapé-Açu, na mesorregião do Nordeste Paraense e Microrregião de Bragantina, estado do Pará, Brasil (Fig. 1). Antes da implantação do povoamento, a área era utilizada para pecuária. Posteriormente, foi transformada em um plantio de *Inga* spp., que foi abandonado, permanecendo em pousio por tempo indeterminado. Durante

esse tempo, a vegetação que se desenvolveu foi do tipo pastagem, que foi suprimida para a instalação deste experimento.

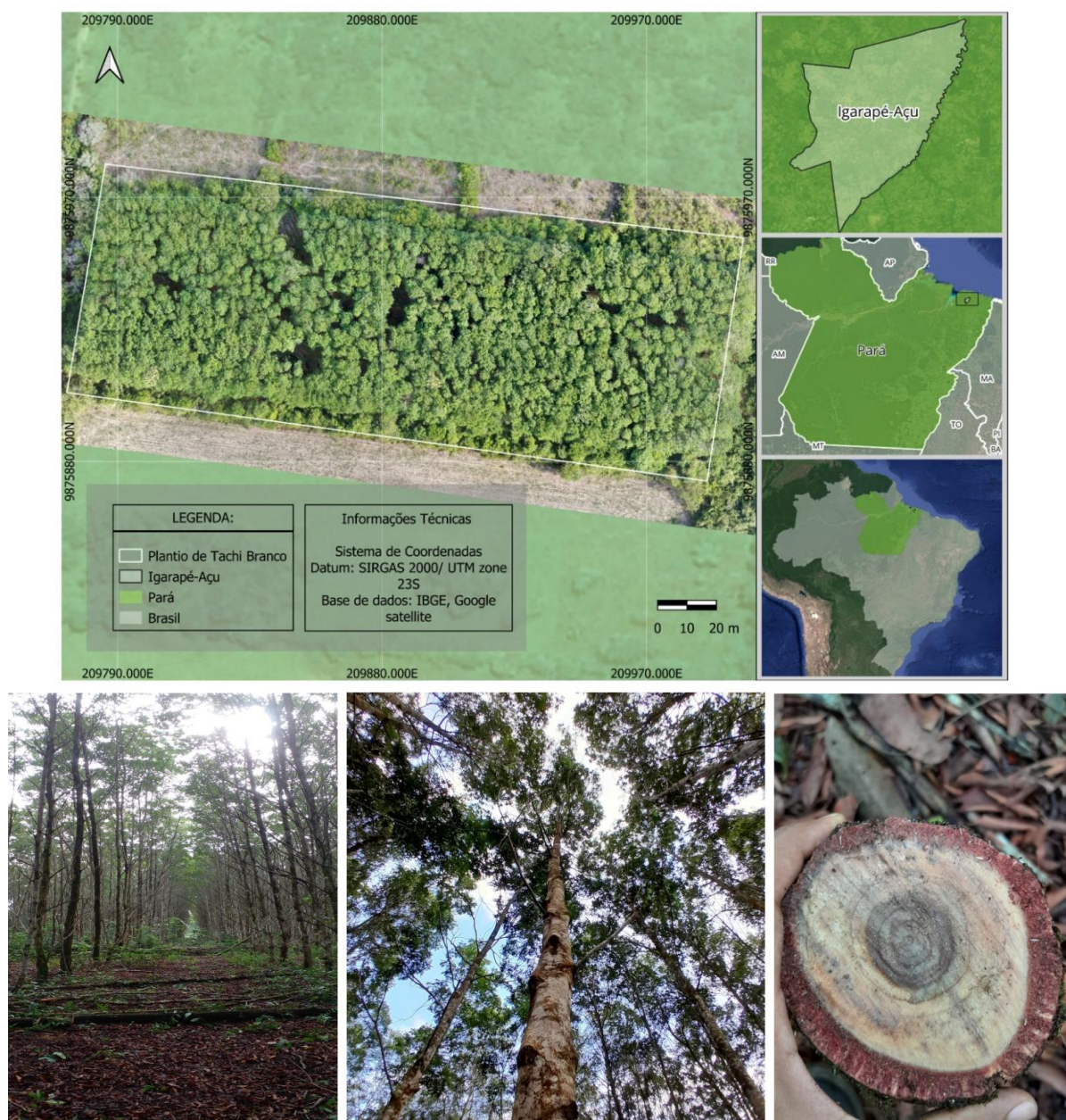


Figura 1. Plantio experimental de *Tachigali vulgaris*, no município de Igarapé-Açu, Pará, Brasil.

O clima da região é classificado como Am, segundo a classificação de Köppen, caracterizado como tropical úmido ou subúmido (Alvares et al. 2013). O município não possui estação meteorológica, foram utilizados dados meteorológicos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET 2024) da estação mais próxima, localizada a 38 km de distância, no município de Castanhal-PA, com os valores correspondentes do período de implantação até a coleta de dados (2016 a 2024). As temperaturas mínima e máxima variam entre 21,4 °C e 32,2 °C, respectivamente. A umidade relativa média foi de 85%, com precipitação média anual de

2.500 mm, com maior concentração nos meses de janeiro a junho, sendo os meses de julho a dezembro os menos chuvosos (Fig. 2). O solo predominante é formado por Latossolo Amarelo, com textura variando de média a muito argilosa (Rousseau et al. 2014).

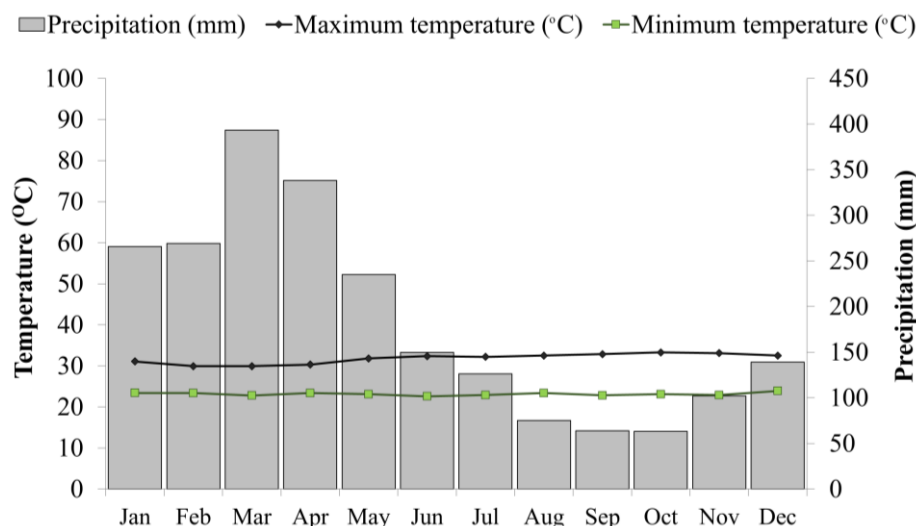


Figura 2. Precipitação mensal (mm) e temperatura média mensal do ar (°C), máxima e mínima, de 2016 a 2024 no município de Igarapé-Açu, Pará, Brasil.

Design experimental

Neste experimento com *T. vulgaris*, dois estudos científicos foram realizados até o momento. O primeiro avaliou a influência da fertilização em diferentes níveis de fósforo (P) e potássio (K) no crescimento e eficiência de utilização de nutrientes em árvores. Os parâmetros analisados foram: (i) crescimento aos 6, 12, 18 e 24 meses pós-plantio; (ii) concentração de nutrientes na biomassa; (iii) eficiência de utilização de nutrientes (EUN); (iv) o coeficiente de utilização biológica (CUB) todos aos 24 meses (Simões et al. 2022). O segundo estudo investigou a influência de variáveis meteorológicas no aumento da altura e do diâmetro. Foram realizadas medições trimestrais ao longo de um período de 2 anos. A primeira medição ocorreu de 1 a 13 meses, a segunda medição de 16 a 28 meses (Palheta et al. 2024).

As sementes de *T. vulgaris* foram adquiridas de produtor certificado, coletadas de matrizes no município de Santarém-PA, com as coordenadas geográficas: 2° 26' 22" S; 54° 11' 55" W. Posteriormente, foram utilizadas para a produção de mudas em viveiro na Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA). Foi aplicado tratamento pré-germinativo para estimular a germinação. Além disso, foi retirada uma parte da porção do tegumento oposta ao eixo embrionário para facilitar o processo de embebição e germinação (Simões et al. 2022). As sementes foram então colocadas em canteiros, utilizando areia lavada como substrato. Após 30

dias, as mudas foram transplantadas para sacos de 15 cm x 25 cm, contendo um volume de 1,9 dm³ de solo.

As mudas foram transplantadas para a área experimental após 8 meses, quando atingiram 40 cm de altura. A área destinada à implantação passou por atividades silviculturais, como limpeza com trator/roçadeira para supressão de pasto e grade-arado para descompactação do solo. Além disso, foram abertos sulcos nas linhas de plantio, com trator-arado, e aplicados 10 g de NPK na formulação comercial 9-28-20.

O plantio experimental foi conduzido para avaliar as respostas da espécie *T. vulgaris* à adubação com fósforo (P), nitrogênio (N) e potássio (K), em esquema fatorial. Os tratamentos foram divididos em três doses de P (0; 65,22; 130,43 kg ha⁻¹), N (0; 88,89; 177,78 kg ha⁻¹) e K (0; 100; 200 kg ha⁻¹), totalizando 27 tratamentos. O tratamento 1 foi considerado como testemunha, onde as doses de P, N e K são nulos (Tabela 1).

Tabela 1. Adubação e dosagem (kg ha⁻¹) nos diferentes tratamentos.

Tratamentos	Siglas	Nitrogênio	Fósforo	Potássio
		N (kg ha ⁻¹)	P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)	K ₂ O (kg ha ⁻¹)
1	N ₁ P ₁ K ₁	0	0	0
2	N ₁ P ₁ K ₂	0	0	100
3	N ₁ P ₁ K ₃	0	0	200
4	N ₁ P ₂ K ₁	0	65,22	0
5	N ₁ P ₂ K ₂	0	65,22	100
6	N ₁ P ₂ K ₃	0	65,22	200
7	N ₁ P ₃ K ₁	0	130,43	0
8	N ₁ P ₃ K ₂	0	130,43	100
9	N ₁ P ₃ K ₃	0	130,43	200
10	N ₂ P ₁ K ₁	88,89	0	0
11	N ₂ P ₁ K ₂	88,89	0	100
12	N ₂ P ₁ K ₃	88,89	0	200
13	N ₂ P ₂ K ₁	88,89	65,22	0
14	N ₂ P ₂ K ₂	88,89	65,22	100
15	N ₂ P ₂ K ₃	88,89	65,22	200
16	N ₂ P ₃ K ₁	88,89	130,43	0
17	N ₂ P ₃ K ₂	88,89	130,43	100
18	N ₂ P ₃ K ₃	88,89	130,43	200
19	N ₃ P ₁ K ₁	177,78	0	0
20	N ₃ P ₁ K ₂	177,78	0	100
21	N ₃ P ₁ K ₃	177,78	0	200
22	N ₃ P ₂ K ₁	177,78	65,22	0
23	N ₃ P ₂ K ₂	177,78	65,22	100
24	N ₃ P ₂ K ₃	177,78	65,22	200
25	N ₃ P ₃ K ₁	177,78	130,43	0
26	N ₃ P ₃ K ₂	177,78	130,43	100
27	N ₃ P ₃ K ₃	177,78	130,43	200

A adubação foi aplicada a uma distância de 10 cm da borda da cova principal. Foram estabelecidos quatro blocos, com espaçamentos de 5 m entre si, com quatro linhas de plantio dispostas no sentido Leste-Oeste. Essa medida foi tomada para facilitar a implementação de futuros experimentos, com o uso de fertilizantes aplicados na superfície do solo, evitando assim a contaminação entre os tratamentos devido ao escoamento da chuva (Palheta et al. 2024).

Cada tratamento representa uma parcela de 8 m x 10 m, com 16 plantas, e cada bloco apresenta os 27 tratamentos organizados de forma sistemática. O plantio experimental foi instalado em 1 de fevereiro de 2016, com espaçamento de 2 m x 3 m (árvores x linhas), conforme recomendação de (Sousa et al. 2016), totalizando 1.728 árvores (Fig. 3).

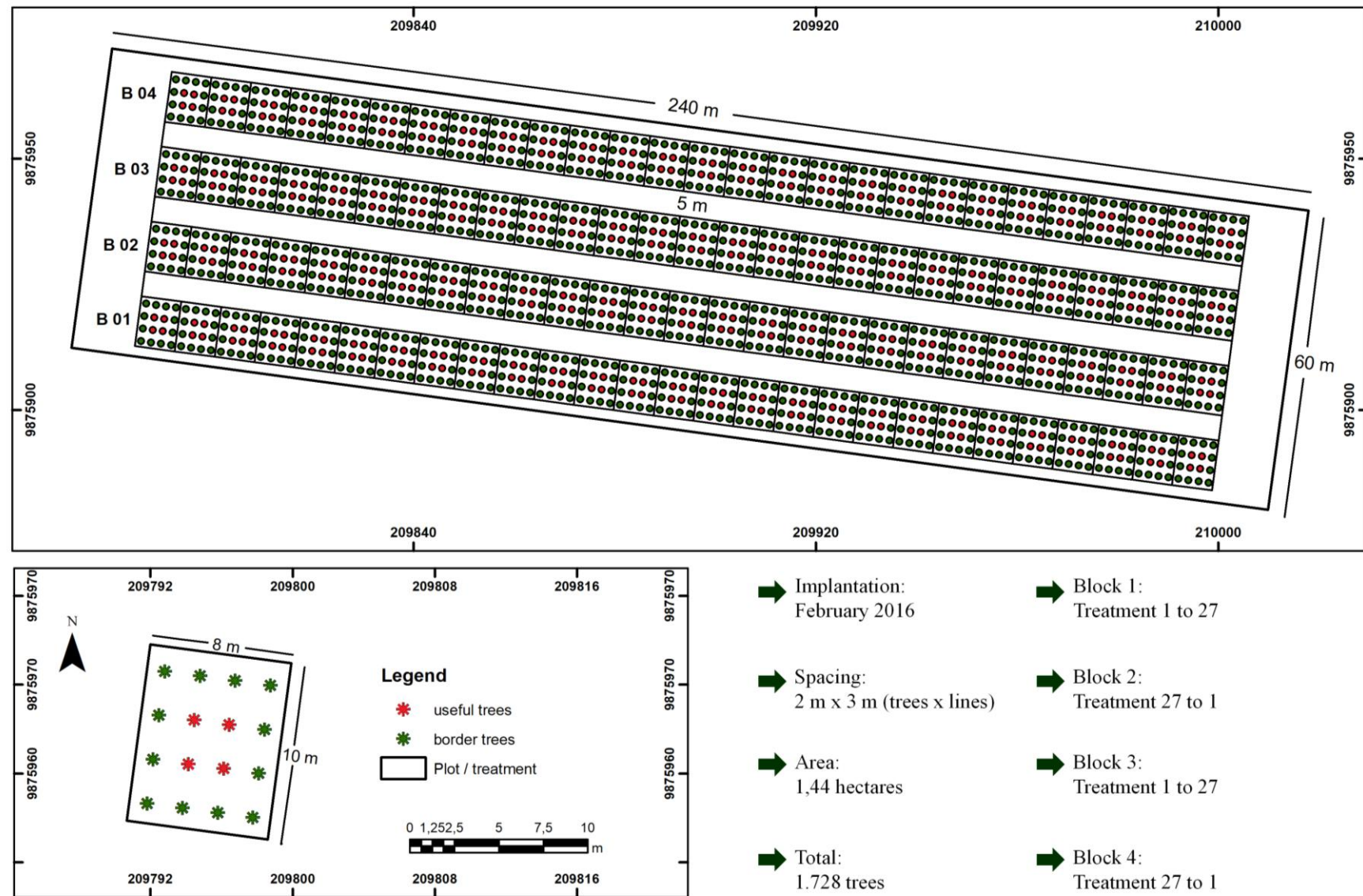


Figura 3. Croqui do plantio experimental de *Tachigali vulgaris*, localizado na Fazenda Escola Igarapé-Açu, pertencente à Universidade Federal Rural da Amazônia, no município de Igarapé-Açu, Pará, Brasil.

Coleta de dados

A coleta de dados foi realizada entre novembro de 2023 e fevereiro de 2024, iniciando com o censo florestal, no qual foram medidas as circunferências a 1,30 m do solo (CAP) de todos os indivíduos, utilizando uma fita métrica. Essas medidas foram posteriormente convertidas para diâmetro à altura do peito (DAP). Para a medição da altura total (ht) foi utilizado o clinômetro eletrônico Haglöl, aparelho que permite obter medidas precisas de forma rápida e eficiente. (Machado and Figueiredo Filho 2014). Essa medição foi realizada por meio de amostragem sistemática, onde foram selecionados dois indivíduos em cada parcela: uma árvore de bordadura e uma árvore útil.

A seleção das árvores para compor a avaliação da biomassa foi realizada com o objetivo de abranger as diferentes classes diamétricas obtidas pelo censo florestal. Em seguida, foi realizada a cubagem rigorosa pelo método de Hohenadl (Machado and Figueiredo Filho 2014). Foram cubadas 40 árvores, divididas em 10 seções representando: 5%, 15%, 25%, 35%, 45%, 55%, 65%, 75%, 85% e 95% em relação à altura total (ht). Para cada seção, foram feitas duas medições de diâmetro com auxílio de uma suta. Além disso, foram coletados discos de madeira para análise laboratorial nas seguintes posições: 0%, 5%, DAP, 25%, 55%, 75% e 95%, com espessura de 5 cm (Fig. 4).

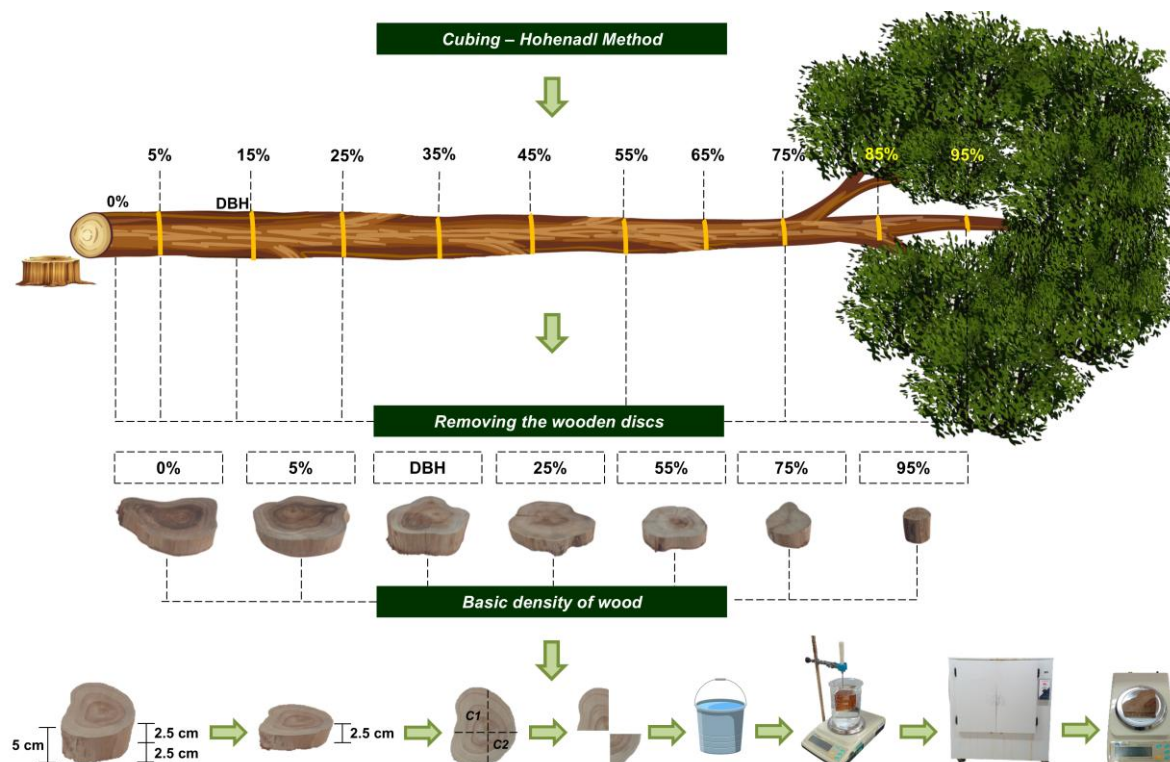


Figura 4. Cubagem de árvores pelo método de Hohenadl, em relação à altura total (ht) e amostragem da retirada de discos de madeira para procedimentos de análise laboratorial.

Processamento e análise de dados

Análise estatística

Para verificar os pressupostos da análise de variância, foi aplicado o teste de Shapiro-Wilk para testar a normalidade dos resíduos. Outro teste aplicado foi o teste de Oneill e Mathews para verificar se as variâncias eram homogêneas, ambos ao nível de significância de 0,05. Os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA: $p < 0,05$) em esquema fatorial 3x3 com delineamento em blocos casualizados com os fatores de fertilização descritos na Tabela 2. Os testes estatísticos foram realizados utilizando o software Rstudio versão 4.3.1 (R Core Team 2023), com a ajuda do pacote “ExpDes.pt” (Ferreira et al. 2021).

Parâmetros dendrométricos

A partir dos dados obtidos, foi elaborada a distribuição diamétrica aplicando-se o método estatístico (Machado and Figueiredo Filho 2014). Para determinar os intervalos de classe, foram calculados a média ($\bar{d}$) e o desvio padrão (s) da população. Em seguida, com base na amostragem total de altura, diferentes modelos hipsométricos foram avaliados para estimar essa variável, e o modelo que foi selecionado (Eq. 1) é descrito a seguir:

$$ht = -0,5719 + 6,9822 \ln(DAP) + e \quad \begin{array}{cc} R^2_{adj} & S_{yx}\% \\ 0,59 & 11,34 \end{array} \quad (1)$$

Legenda: ht = altura total (m), DAP = diâmetro a 1,30 m acima do solo (cm), $\ln$ = logaritmo natural, R^2_{adj} = coeficiente de determinação ajustado, $S_{yx}\%$ = erro padrão da estimativa, em porcentagem.

Utilizando essa relação hipsométrica, foi gerada a distribuição de altura, seguindo o mesmo princípio da distribuição diamétrica, e posteriormente foi estabelecida a correlação entre ambas as variáveis. Além disso, foram construídos mapas de densidade Kernel, utilizando o número de indivíduos por classe de diâmetro, considerando cinco categorias de densidade: muito baixa, baixa, média, alta e muito alta, com a escala variando de verde a vermelho, respectivamente.

Determinação do volume

O volume sem casca e com casca (m^3) das árvores cubadas foi determinado seguindo o método de Hohenadl (Machado and Figueiredo Filho 2014), de acordo com (Eq. 2).

$$v = \frac{ht}{10} (g_{0,05} + g_{0,15} + g_{0,25} + g_{0,35} + g_{0,45} + g_{0,55} + g_{0,65} + g_{0,75} + g_{0,85} + g_{0,95}) \quad (2)$$

Legenda: v = volume total (m^3), ht = altura total da árvore (m), g = área da seção transversal de cada seção (m^2).

Com base nos volumes, foi estimado o Incremento Médio Anual ($m^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) das árvores cubadas sem casca e com casca, conforme (Eq. 3) (Oliveira et al. 2021).

$$IMA = \frac{v * N * S}{T} \quad (3)$$

Legenda: IMA = incremento médio anual ($m^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), v = volume (m^3), N = número de árvores por hectare (1666 árvores ha^{-1} ; espaçamento $2 \text{ m} \times 3 \text{ m}$), S = taxa de sobrevivência em (%), T = idade (anos).

Densidade básica da madeira

Os discos de madeira foram coletados com espessura de 2,5 cm e seccionados em quatro cunhas, incluindo partes da medula, cerne e alburno para representar adequadamente o disco. Duas cunhas opostas foram utilizadas para determinar a densidade básica da madeira, seguindo as recomendações da norma brasileira NBR 11941 (ABNT 2003). As cunhas foram imersas em água até atingirem a saturação para obtenção do volume saturado (cm^3). Logo após, as amostras foram secas em estufa com circulação forçada de ar, à temperatura de $105 \pm 2^\circ \text{C}$, até atingirem massa constante. A densidade básica foi determinada pela (Eq. 4) abaixo.

$$DB = \frac{ms}{vsat} \quad (4)$$

Legenda: DB = densidade básica da madeira (g/cm^3), ms = massa seca da madeira (g), $vsat$ = volume saturado da madeira (cm^3)

A densidade básica (Eq. 4) foi calculada para cada disco nas seguintes posições: 0%, 5%, DAP, 25%, 55%, 75% e 95%. Para avaliar a normalidade, foi aplicado o teste de Shapiro-Wilk. Além disso, o teste de Oneill e Mathews foi utilizado para verificar a homogeneidade das variâncias, ambos ao nível de significância de 0,05. Para comparar as médias das densidades nas diferentes posições, foi utilizado o teste de Tukey com significância de 0,05. Todos os testes estatísticos foram aplicados utilizando o software Rstudio versão 4.3.1 (R Core Team 2023), com auxílio do pacote “ExpDes.pt” (Ferreira et al. 2021).

Para determinar a densidade básica das árvores, foi calculada uma média ponderada conforme descrito por (Trugilho 2009), utilizando (Eq. 5). Em seguida, foi estabelecida a correlação com a variável diâmetro.

$$\overline{DBp} = \frac{v_1 * (DBm_{(0\%-5\%)}) + v_2 * (DBm_{(5\%-DAP)}) + \dots + v_6 * (DBm_{(75\%-95\%)})}{\sum_{i=1}^n v_i} \quad (5)$$

Legenda: $\overline{DBp}$ = densidade básica média ponderada; DBm = densidade básica média entre as posições: (0% - 5%), (5% - DAP), (DAP - 25%), (25% - 55%), (55% - 75%) e (75% - 95%) em relação à altura total, g/cm^3 . v = volume das seções entre as posições: (0% - 5%), (5% - DAP), (DAP - 25%), (25% - 55%), (55% - 75%) e (75% - 95%) em relação à altura total, m^3 .

Estimativa de biomassa seca e estoque de carbono

A determinação da biomassa seca de cada árvore cubada ocorreu pela multiplicação do volume sem casca (m³) (Eq. 2) pela densidade básica média ponderada da árvore em (kg/m³) (Eq. 5), conforme (Eq. 6).

$$Bs = \overline{DBW} * v \quad (6)$$

A biomassa seca por hectare foi calculada de acordo com (Eq. 7) (Orellana et al. 2018).

$$BS/ha = Bs * \left(\frac{F * 10000}{Ft * e} \right) \quad (7)$$

Legenda: Bs = Biomassa seca da árvore, em Kg, F = frequência absoluta de árvores em cada classe de diâmetro, Ft = frequência total de árvores na plantação, ou = espaçamento de plantio (m²).

A determinação do estoque de carbono foi realizada com base no valor da biomassa seca da árvore multiplicando-se o fator de 49,8%, conforme (Eq. 8). Esse valor foi encontrado para madeira sem casca da espécie *T. vulgaris* na pesquisa (Silva et al. 2021).

$$C = Bs * 0,498 \quad (8)$$

Legenda: C = carbono, em kg, Bs = biomassa da árvore, em kg.

3 Resultados

Análise estatística

O teste de Shapiro-Wilk apresentou um p-valor de 0,8487 indicando a normalidade dos resíduos e o teste de Oneill e Mathews com um p-valor de 0,7058 indicando a homogeneidade das variâncias. Portanto, foi realizada a análise de variância com três fatores (Tabela 2).

Tabela 2. Resultado da análise estatística das médias dos diâmetros de cada tratamento.

FV	GL	SQ	QM	Fc	P-valor
Nit.	2	10,25	5,12	2,68	0,0745
Fos.	2	5,30	2,65	1,38	0,2559
Pot.	2	26,36	13,18	6,89	0,0017*
Interação Nit. x Fos.	4	5,39	1,34	0,70	0,5904
Interação Nit. x Pot.	4	9,02	2,25	1,17	0,3263
Interação Fos. x Pot.	4	4,19	1,04	0,54	0,7005
Interação Nit. x Fos. x Pot.	8	5,03	0,62	0,32	0,9526
Resíduos	81	154,93	1,91	-	-
Total	107	220,51	-	-	-

Legenda: FV = fonte de variação; GL = grau de liberdade; SQ = soma dos quadrados; QM = quadrado médio do resíduo; Fc = estatística F calculada; Nit = fator 1 Nitrogênio; Fos = fator 2 Fósforo; e Pot = fator 3 Potássio.

Como apenas o fator potássio foi significativo, foi aplicado o teste de médias de Tukey com significância de 5% (Tabela 3), para verificar qual a dosagem testada apresentou o melhor resultado.

Tabela 3. Valores correspondentes aos níveis de aplicação de Potássio.

Níveis	Médias	Grupos
Potássio 200 kg ha ⁻¹	15.36 cm	a
Potássio 100 kg ha ⁻¹	14.69 cm	ab
Potássio 0 kg ha ⁻¹	14.15 cm	b

A dosagem de 200 kg ha⁻¹ apresentou o maior diâmetro quadrático médio e a dosagem de 0 kg ha⁻¹ indicou o menor diâmetro quadrático médio. A dosagem de 100 kg ha⁻¹ foi estatisticamente igual às outras duas dosagens já citadas.

Parâmetros dendrométricos

Com base nos parâmetros dendrométricos coletados no inventário florestal, foram avaliados 1.397 indivíduos, dos quais 123 eram bifurcados, correspondendo a 7,12% do plantio, enquanto os indivíduos mortos (331) representaram um percentual de 19,16%. Os valores de DAP variaram de 2,4 a 29,1 cm, com média e desvio padrão de 14,6 e 4,83 cm, respectivamente. A altura total variou de 5,50 a 23,60 m, com média de 17,70 m e desvio padrão de 2,70 m. A soma da área basal representou 28,6600 m² ha⁻¹.

A predominância de indivíduos nas classes centrais (3 a 5) da distribuição é uma característica comum em florestas plantadas, pois reflete sua homogeneidade, que geralmente são compostas por uma única espécie e possuem a mesma idade. Onde a curva gerada exibe um padrão unimodal, representado por um pico, o que sugere uma distribuição normal dos valores de diâmetro em torno da média (14,6 cm). É importante ressaltar a baixa representatividade observada nas classes 1 (< 2,5 cm), com apenas um indivíduo, e na classe 7 (26,7 a 31,6 cm), conforme ilustrado na Fig. 5a.

A análise da distribuição da altura total dos indivíduos revela que os valores mais comuns entre as árvores do plantio são representados pelas classes 4 (16,4 a 19,1 m) e 5 (19,1 a 21,8 m), conforme ilustrado na Fig. 5b, indicando uma concentração em torno da média (17,70 m). Isso demonstra que a maioria das árvores é mais alta, enquanto algumas exceções estão bem abaixo da média, o que pode indicar fatores como competição por recursos naturais que comprometeram seu crescimento.

A partir da relação entre a variável diâmetro e altura total, observou-se uma correlação linear positiva. Este resultado indica que quanto maior o diâmetro, a altura total também tende a aumentar, apresentando uma correlação muito forte ($r = 0,95$). O valor de $p < 0,001$ sugere que esta associação é estatisticamente significativa, como observado na Fig. 5c. Embora o diâmetro seja uma variável significativa, outros fatores também podem influenciar a altura total das árvores, como as condições ambientais (disponibilidade de água, nutrientes do solo, radiação solar e temperatura) que podem afetar o crescimento das árvores.

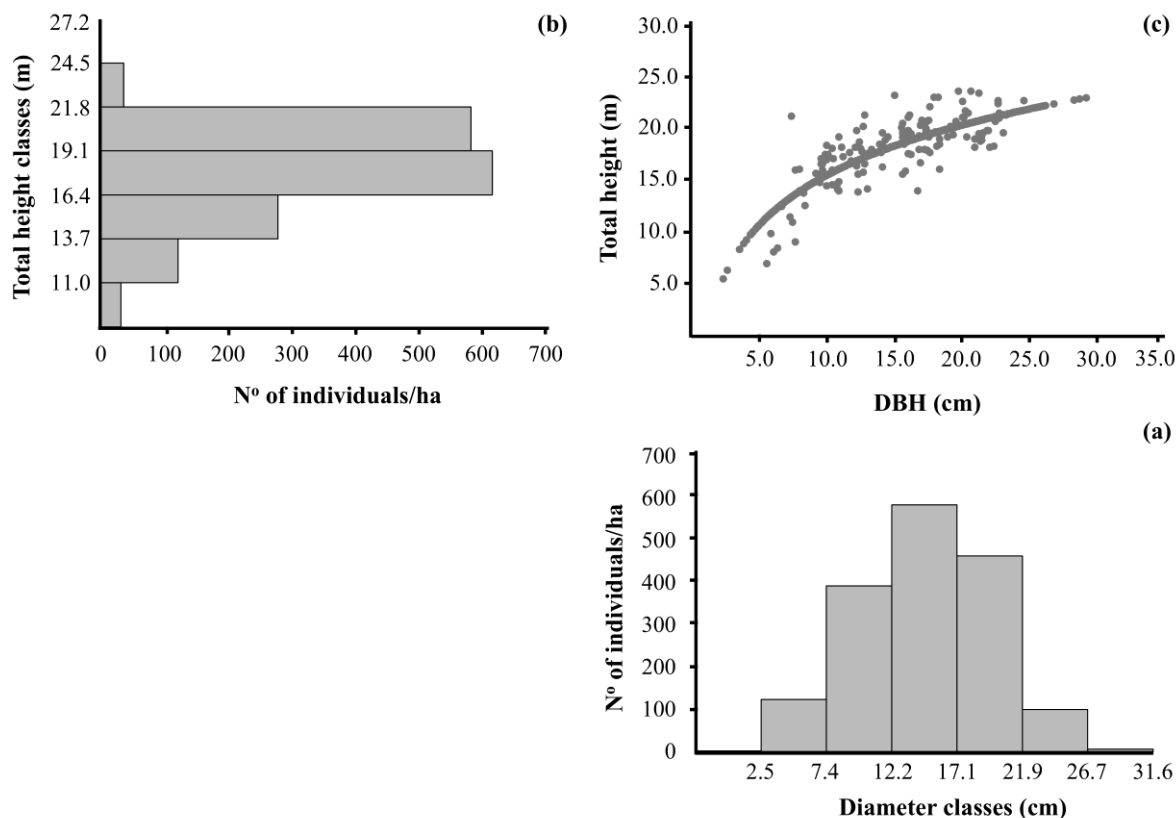


Figura 5. (a) Distribuição diamétrica; (b) Distribuição da altura total; (c) Relação entre DAP e altura total do plantio experimental de *Tachigali vulgaris*, no município de Igarapé-Açu, Pará, Brasil.

O mapa de densidade de Kernel criado de acordo com as classes de diâmetro pode ser visto na Fig. 6, onde as cores variam de valores menos densos (verde) a maiores densidades de indivíduos (vermelho). Devido ao fato da Classe 1 (< 2,5 cm) ser representada por apenas um indivíduo, não foi possível criar o mapa para esta classe. O mapa com 0 cm representa os indivíduos classificados como mortos durante o levantamento de inventário florestal, destacando as áreas com alta densidade de árvores mortas (em vermelho). Observou-se que essa mortalidade foi atribuída principalmente a fatores ambientais, e ficou claro que a queda de algumas árvores desencadeou a queda de outras. Outro fator que pode ser citado é a competição excessiva por recursos naturais em determinadas áreas. No entanto, não foram identificadas visualmente árvores que tenham sido significativamente afetadas por ataques de pragas/doenças a ponto de sua sobrevivência ter sido comprometida.

Áreas classificadas como de alta densidade de árvores com diâmetro entre 2,5 e 7,4 cm (classe 2) devem ser manejadas, pois seu crescimento é muito limitado devido à intensa competição com indivíduos dominantes pertencentes às classes 6 e 7, que apresentam forte sobreposição nessas áreas, conforme ilustrado na Fig. 6. As classes 3, 4 e 5 apresentam uma

característica comum, a dispersão de densidades altas e muito altas, resultado atribuído à sua representatividade em termos de número de indivíduos na plantação. A classe 3 (7,4 a 12,2 cm) denota árvores sob intensa competição, o que restringe o desenvolvimento devido à limitação de recursos naturais, como radiação solar, nutrientes e espaço. Essa intensa competição aumenta o risco de estagnação do crescimento para a maioria dessas árvores.

A classe 4 (12,2 a 17,1 cm) inclui árvores com valores de diâmetro em torno da média (14,6 cm), sugerindo potencial de crescimento, uma vez que essas áreas com densidade muito alta estão localizadas em regiões menos impactadas pelas classes dominantes, onde há menor pressão sobre recursos e melhores condições para seu desenvolvimento. As árvores pertencentes à classe 5 (17,1 a 21,9 cm) se destacaram em relação às demais classes devido ao seu melhor desempenho relativo. No entanto, ainda enfrentam limitações devido à alta competição em algumas áreas. Uma estratégia eficiente seria reduzir a densidade nas classes de menor diâmetro para aliviar a pressão e promover o crescimento das árvores mais promissoras.

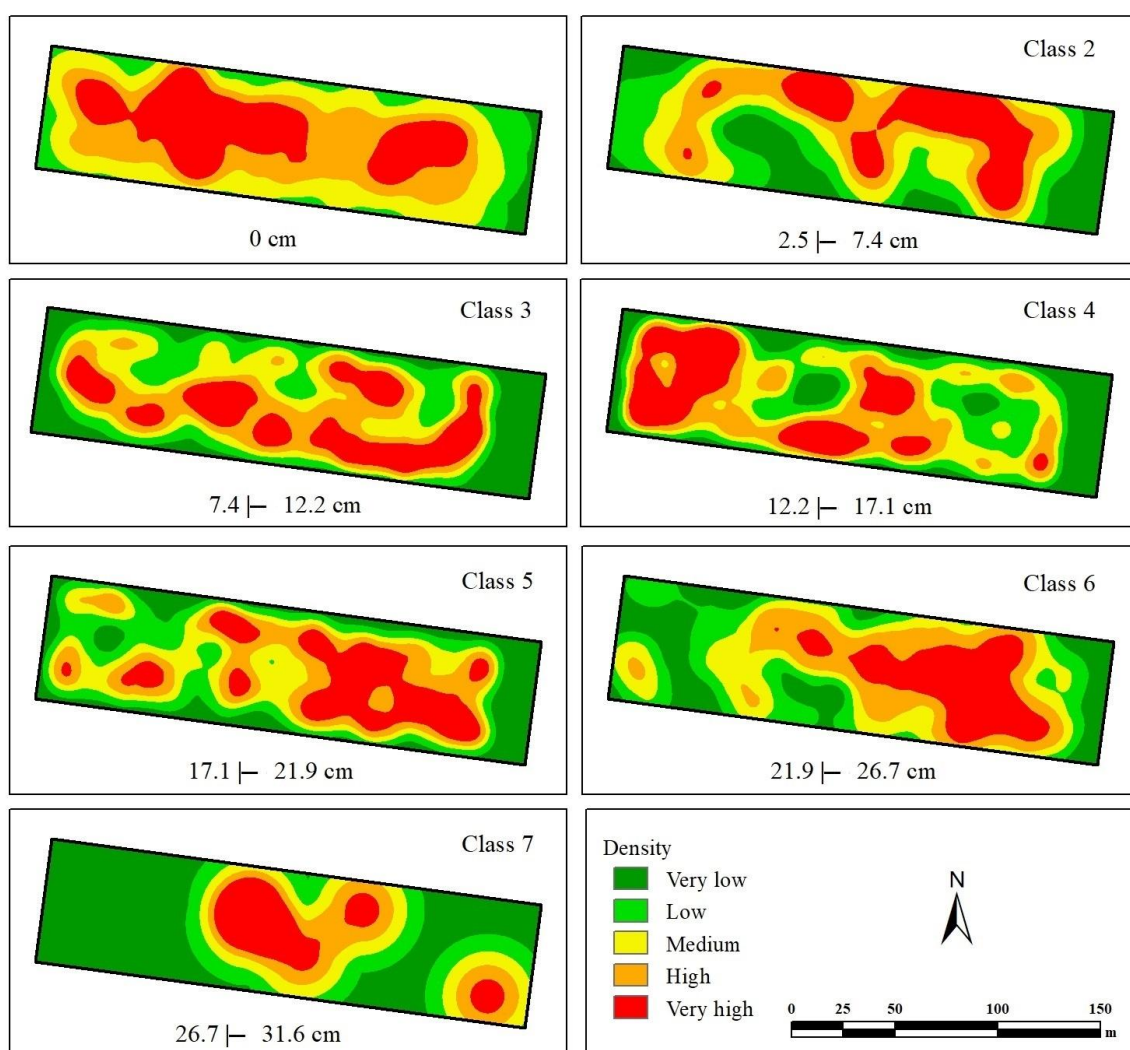


Figura 6. Mapa de densidade de grãos de indivíduos de *Tachigali vulgaris* avaliados no censo florestal, por classes de diâmetro, no município de Igarapé-Açu, Pará, Brasil.

As classes 6 (21,9 a 26,7 cm) e 7 (26,7 a 31,6 cm) pertencentes aos indivíduos dominantes, além de serem áreas de alto potencial produtivo. A classe 7 apresenta padrões isolados de altíssima densidade, o que está relacionado a indivíduos que estão em melhores condições de crescimento. Esse padrão pode ser atribuído à alta mortalidade de árvores próximas, o que gerou grandes clareiras, e assim reduziu a competição por recursos e proporcionou mais espaço, fatores que foram favoráveis ao desenvolvimento desses indivíduos. De forma geral, a utilização do mapa de densidade de Kernel pode ser fundamental em etapas de atividades silviculturais no inventário florestal, bem como na prospecção de áreas com alto potencial, propícias para desbaste e na seleção de árvores que possam ser representativas de uma determinada classe diamétrica, pois é possível ter uma dimensão da distribuição espacial dos indivíduos na área de plantio.

Os valores de volume e incremento médio anual são parâmetros essenciais para estimar a capacidade de produção de biomassa, pois representam o crescimento e a dinâmica da floresta. As árvores submetidas à cubagem rigorosa apresentaram volumes variando de 0,0138 a 0,4651 m³, com volume médio de 0,1662 m³ e desvio padrão de 0,0923 m³, evidenciando a variabilidade em suas características estruturais. O incremento médio anual (IMA) sem casca foi de 28,4 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ e com casca foi de 31,3 m³ ha⁻¹ ano⁻¹, reforçando o potencial produtivo do plantio analisado.

Densidade básica da madeira

A análise da densidade básica ao longo do fuste apresentou variação significativa ($p < 0,05$), com tendência de diminuição da base para o topo (Fig. 7b). A densidade média na base do fuste (0% da altura total) foi de 0,545 g cm⁻³, enquanto na altura relativa de 95% foi de 0,425 g cm⁻³, representando uma redução de aproximadamente 22%. A densidade básica média encontrada para árvores de *T. vulgaris* foi de 0,468 g cm⁻³ e com desvio padrão de 0,051 g cm⁻³ (Fig. 7a), apresentando valores individuais variando de 0,358 a 0,584 g cm⁻³. Além disso, foi observada uma relação linear positiva e estatisticamente significativa ($r = 0,64$; $p < 0,001$) entre a densidade básica da madeira e o DAP, indicando que árvores com maior diâmetro tendem a ter madeira mais densa. O modelo linear ajustado explicou aproximadamente 40% da variabilidade observada na densidade básica (Fig. 7c), mostrando que o DAP é uma variável importante, mas que outros aspectos, como condições ambientais, também podem ter influenciado as características da densidade básica das árvores de *T. vulgaris*.

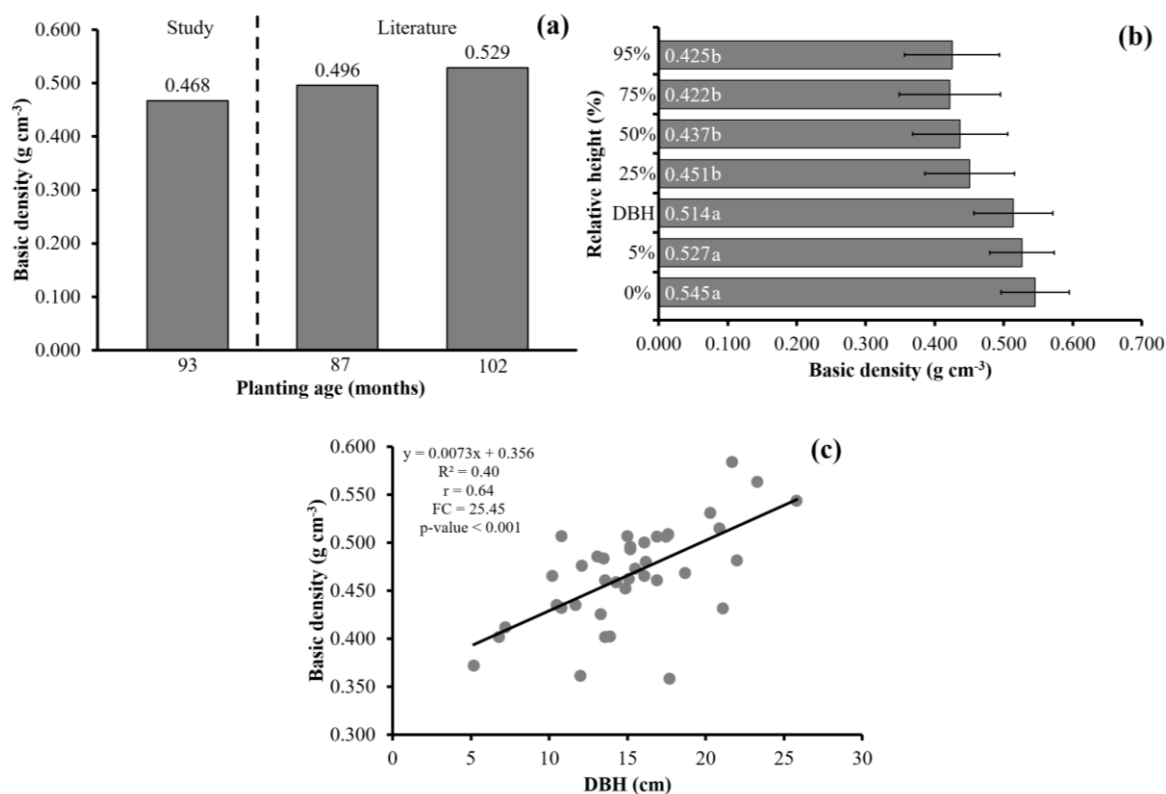


Figura 7. (a) Densidade básica média; (b) Densidade básica em diferentes posições em relação à altura total; (c) Relação entre DAP e densidade básica para o plantio experimental de *Tachigali vulgaris*, no município de Igarapé-Açu, Pará, Brasil.

Estimativa de biomassa seca e estoque de carbono

A Tabela 4 apresenta dados exclusivamente das árvores que passaram pelo rigoroso processo de cubagem no plantio de *T. vulgaris*, refletindo as médias dos parâmetros dendrométricos, além da quantidade de biomassa seca produzida por árvore e por hectare. A produção de biomassa seca variou de 5,13 a 252,74 kg árv⁻¹ e de 559,03 a 67106,27 kg ha⁻¹ equivalente a (0,56 a 67,11 Mg ha⁻¹) entre as classes de diâmetro. Essa grande variação nos valores pode ser atribuída, em grande parte, à tendência de árvores com maiores diâmetros acumularem mais biomassa, devido ao aumento do volume de madeira. No entanto, algumas exceções foram identificadas, com algumas árvores apresentando discrepâncias nos valores de biomassa, sugerindo que a densidade básica da madeira teve papel determinante, mesmo apresentando volumes menores, registrando, portanto, maiores valores individuais de biomassa entre as classes. A compreensão desses fatores é crucial, pois eles influenciam tanto as taxas de crescimento da biomassa quanto a eficiência de conversão de carbono.

Tabela 4. Valores médios de produção de biomassa seca do plantio experimental de *Tachigali vulgaris*, aos 93 meses de idade, no município de Igarapé-Açu, Pará, Brasil.

Classes Diamétricas	N/ha	n	DAP (cm)	ht (m)	Biomassa seca		Carbono	
					kg árv ⁻¹	kg ha ⁻¹	kg árv ⁻¹	kg ha ⁻¹
– 2,5	1							
2,5 – 7,4	99	3	6,4	11,45	8,54	931,21	4,25	463,74
7,4 – 12,2	325	7	11,2	17,75	41,65	14.903,34	20,74	7.421,86
12,2 – 17,1	463	18	14,9	19,28	73,94	37.655,97	36,82	18.752,67
17,1 – 21,9	374	9	19,2	20,68	115,63	47.622,77	57,59	23.716,14
21,9 – 26,7	81	3	23,7	21,48	178,04	15.798,04	88,66	7.867,42
26,7 – 31,6	4							
Total		40						

Legenda: N/ha = número de árvores hectare; n = número de árvores; DAP = diâmetro a 1,30 m acima do solo (cm); ht = altura total (m)

Os valores médios estimados para os estoques de carbono, distribuídos por classes diamétricas, são apresentados na Tabela 6. Eles variaram entre 2,55 e 125,86 kg árv⁻¹ e entre 278,40 e 33418,92 kg ha⁻¹, equivalentes a 0,28 e 33,42 Mg ha⁻¹. Essa variação nos valores individuais se reflete no acúmulo de biomassa seca. Outro ponto é a densidade populacional em cada classe diamétrica, que pode influenciar os valores por hectare. A classe 5 (17,1 a 21,9 cm), apresentando maior contribuição por área devido aos valores por árvore de biomassa seca e carbono, além de ser a segunda classe mais representativa. Por outro lado, na classe 6 (21,9 a 26,7 cm), apesar do maior estoque de carbono por árvore, a menor densidade populacional reduz a contribuição total por hectare. Esses resultados ressaltam a importância dos estoques de carbono por área, influenciados principalmente pela densidade populacional nas classes.

4 Discussão

Parâmetros dendrométricos

O diâmetro médio de 14,6 cm obtido aos 93 meses no estudo foi superior ao encontrado por (Teixeira et al. 2024) que encontraram médias de 14,02 cm e 14,47 cm em dois tipos de solos: franco-arenoso e argiloso aos 120 meses. Essa diferença pode estar relacionada a fatores genéticos que têm grande influência, já que diferentes variedades genéticas podem ter características distintas. Além disso, fatores ambientais também influenciam nessa variação. A altura total registrada por (Teixeira et al. 2024) apresentou valores médios entre 18,47 e 18,95 m, enquanto (Lima et al. 2023) obtiveram valores entre 18,51 e 20,86 m em (87-102 meses). Em comparação, nossos resultados foram de 17,70 m de altura média.

A distribuição diamétrica é um método tradicionalmente usado na medição florestal para entender o crescimento florestal (Lima e Leão 2013). Com base em estudos de (Lima e Leão 2013) e (Lima et al. 2017) A ausência de intervenções silviculturais permitiu um crescimento mais natural das árvores, permitindo que as condições ambientais exercessem uma enorme influência. Podemos dizer que as árvores dominantes na plantação se beneficiaram principalmente devido à mortalidade das árvores ao redor, o que reduziu a competição por luz, água e nutrientes, enquanto as menores, mais suscetíveis à falta de nutrientes, foram suprimidas. Este tipo de comportamento pode ser interpretado como uma consequência natural do processo de desenvolvimento florestal (Lima e Leão 2013). O resultado é uma curva de distribuição de diâmetro que tende a exibir uma assimetria para a direita, refletindo a predominância de árvores em torno da média de 14,6 cm, e um achatamento da curva à medida que aumenta a competição entre árvores por recursos limitados. (Lima et al. 2017).

O uso do mapa de distribuição Kernel permitiu uma visualização mais detalhada da distribuição espacial das árvores, identificando áreas com maiores concentrações dentro de cada classe de diâmetro, destacando áreas com alto potencial, suprimidas pela competição. O mapa Kernel, conforme destacado por (Vendruscolo et al. 2020), oferece uma ferramenta essencial para a compreensão da distribuição espacial das variáveis florestais. Além disso, pode proporcionar uma visão mais clara de áreas que requerem atenção especial em termos de manejo florestal, pois revela áreas com alta competitividade entre árvores, ou mesmo áreas que requerem intervenções para promover uma melhor distribuição de recursos e estimular o crescimento.

Volume sem casca e aumento médio anual

Nosso estudo, no plantio de *T. vulgaris* aos 93 meses de idade, mostrou um incremento médio anual sem casca de $28,4 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, e com casca de $31,3 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, valor superior ao encontrado por (Teixeira et al. 2024) para a mesma espécie, na qual observaram um aumento de casca de $25,2 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ aos 120 meses de idade. Questões metodológicas devem ser levadas em conta, uma vez que o estudo utilizou volumes reais de uma amostra representativa das diferentes classes diamétricas, enquanto a literatura aplicou uma equação para estimar o volume de toda a plantação, e talvez incluindo áreas menos produtivas.

É importante ressaltar que esse aumento poderia ter sido ainda maior caso o desbaste tivesse sido realizado durante o plantio. Podemos verificar o potencial produtivo do *T. vulgaris* comparando-o com outras espécies de rápido crescimento comumente plantadas na região amazônica, como o *Eucalyptus* spp., onde o aumento médio com casca é estimado em torno de

33,7 m³ ha⁻¹ ano⁻¹, aos 86 meses de idade, com variação regional (IBÁ 2024), enquanto *Schizolobium amazonicum* apresenta aumento de casca de 27,2 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ aos 228 meses de idade (Mascarenhas et al. 2021). Outros aumentos com casca de espécies, como *Pinus* spp. com 30,9 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ aos 168 meses (IBÁ 2024) e *Tectona grandis* (Sanquetta et al. 2016) com 15.3 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ aos 84 meses.

É amplamente reconhecido que espécies do gênero *Eucalyptus* dominam as plantações florestais no Brasil. No entanto, sua adaptabilidade a diferentes condições ambientais pode apresentar variações significativas, o que impacta diretamente na produtividade em diferentes ambientes (Cunha et al. 2021). Estudos recentes têm demonstrado que, em certas regiões, a produtividade dessas espécies diminui substancialmente devido às variações climáticas. (Resende et al. 2018). Como exemplo, nas conclusões de (Elli et al. 2019) e (Gonçalves et al. 2017) o que indicou que o IMA para o gênero *Eucalyptus* na região Norte do Brasil é menor em comparação às demais regiões do país, variando de 25 a 35 m³ ha⁻¹ ano⁻¹. Esses achados podem estar relacionados à disponibilidade de água, especialmente em regiões tropicais com clima Am, onde o estresse hídrico ocorre com frequência (Oliveira et al. 2021). Essa ocorrência afeta diretamente a produtividade das plantações florestais, prejudicando o crescimento e o acúmulo de biomassa.

A diversidade de espécies plantadas na Amazônia, sejam elas exóticas ou nativas, resulta em grande variação nos valores de aumento médio anual (IMA) (Melo et al. 2016; Elli et al. 2019). Essa variação está relacionada a diversos fatores recorrentes, tais como: (i) qualidade da produção de mudas; (ii) tipo de solo; (iii) regime de precipitação; (iv) práticas de manejo adotadas; (v) fertilização do solo; (vi) adaptabilidade das espécies à região; e (vii) espaçamento entre árvores. (Gonçalves et al. 2017; Elli et al. 2019; Oliveira et al. 2021).

A literatura sugere que valores mais altos de MAI estão geralmente associados a maior produção de biomassa, o que torna essas espécies atrativas para comercialização. Nossos resultados são muito promissores, pois estão em torno dos valores encontrados para o gênero *Eucalyptus*. Comparações com espécies desse gênero são importantes, a fim de potencializar o uso da espécie *T. vulgaris* em futuras plantações energéticas. No entanto, é essencial considerar também outras características, como densidade básica (Oliveira et al. 2021), variável importante na avaliação da viabilidade e sustentabilidade das plantações florestais.

Densidade básica da madeira

Em nosso estudo, a densidade básica média da madeira de *T. vulgaris*, 0,468 g cm⁻³ aos 93 meses, foi menor quando comparada aos achados em plantações da mesma espécie,

avaliadas aos 87 meses ($0,496 \text{ g cm}^{-3}$) (Silva et al. 2021) e aos 102 meses ($0,529 \text{ g cm}^{-3}$) (Moraes et al. 2023). A literatura, de modo geral, relata que com o aumento da idade, os indivíduos tendem a apresentar maior densidade básica, devido ao aumento da proporção de madeira e à redução da heterogeneidade nas propriedades da madeira (Lima et al. 2023). Entretanto, esse tipo de comportamento não foi observado em nossos resultados, e pode estar relacionado às limitações e alta competição por recursos naturais, que causaram estagnação no crescimento das árvores ao longo dos anos, uma vez que a plantação nunca passou por desbaste. No estudo aos 87 meses, a faixa de variação da densidade básica foi de $0,419$ a $0,606 \text{ g cm}^{-3}$, enquanto aos 102 meses foi de $0,439$ a $0,624 \text{ g cm}^{-3}$. Em comparação, nossos resultados mostraram uma variação de $0,358$ a $0,584 \text{ g cm}^{-3}$.

Por sua vez, com o aumento da idade cambial, as características anatômicas podem mudar, como comprimento da fibra, espessura da parede celular da fibra, fração da parede celular (Sette-junior et al. 2012; Palermo et al. 2015; Liu et al. 2020), que influencia diretamente na densidade da madeira. Assim como a diminuição da densidade básica ao longo do sentido longitudinal, que também está relacionada principalmente às variações anatômicas que ocorrem ao longo do fuste (Oliveira et al. 2018). A variação da densidade longitudinal já foi verificada em outros estudos com a espécie (Barros-junior et al. 2022; Moraes et al. 2023).

A relação entre o diâmetro da árvore e a densidade básica de *T. vulgaris* foi verificada por (Orellana et al. 2018) e pode estar associada a condições de crescimento, que podem afetar a formação da parede celular e a densidade básica. *T. vulgaris*, em geral, apresenta densidades menores nos anos iniciais (próximo à medula), seguindo a tendência de aumento da densidade com a idade cambial (Moraes et al. 2023). Isso está relacionado às características de espécies pioneiras de rápido crescimento, que alocam recursos para o crescimento em altura, produzindo madeira de menor densidade. Após atingir o dossel, essas árvores redirecionam os recursos para o crescimento em diâmetro, corrigindo o desequilíbrio estrutural e resultando em madeira mais densa. Esse padrão reflete uma estratégia adaptativa que equilibra o estabelecimento rápido com a resistência estrutural ao longo do tempo (Williamson and Wiemann 2010; Ramananantoandro et al. 2016).

Estimativa de biomassa seca e estoque de carbono

No estudo os resultados obtidos indicaram que a biomassa seca das árvores de *Tachigali vulgaris* variou de $0,56$ a $67,11 \text{ Mg ha}^{-1}$. Evidenciando árvores maiores tendem a acumular mais biomassa, mas algumas menores mostraram maiores valores individuais, sugerindo que a

densidade básica da madeira influenciou esses resultados. Esses fatores são importantes para a compreensão do crescimento de biomassa.

As pesquisas desenvolvidas em relação a quantificação de biomassa indicam maior representatividade no tronco, o que era esperado, representando, em média, entre 79% e 82% da biomassa total, o que varia conforme a espécie (Poletto et al. 2020; Schwerz et al. 2020). Algumas espécies tendem a alocar uma maior quantidade de biomassa nos seguintes compartimentos (galhos e folhas) devido às suas copas densas, em relação a outras espécies (Ribeiro et al. 2023). Além disso, a alocação de biomassa no tronco está diretamente relacionada ao seu papel essencial como estrutura de sustentação, além de ser crucial para a condução de água e nutrientes.

Para a silvicultura, os compartimentos de maior interesse são a madeira, devido à sua relevância econômica (Sanquetta et al. 2018). É importante destacar que plantações florestais com espécies de rápido crescimento, que apresentam altos incrementos médios anuais, nos primeiros anos de idade (entre 5 e 7 anos) apresentam grande potencial de produção de biomassa e sequestro de carbono (Sanquetta et al. 2018).

Para a estimativa de biomassa de uma determinada espécie, vários fatores estão intimamente relacionados, como à sua capacidade adaptativa, que é influenciada pelas condições ambientais locais. Essas condições podem limitar significativamente o potencial de crescimento e consequentemente o acúmulo de biomassa, conforme mencionado por (Barros et al. 2024). Fatores ambientais como baixa pluviosidade, redução da fertilidade do solo e insuficiência de nutrientes desempenham um papel determinante neste processo (Ortega Rodriguez and Tomazello-Filho 2019; Barros et al. 2024). Esses fatores são considerados os principais que comprometem a disponibilidade de recursos essenciais para o crescimento das árvores.

Além disso, o adensamento das plantações florestais, em relação ao número de árvores por hectare, implica na quantidade de biomassa de caule e, portanto, um maior estoque de carbono armazenado. Isso destaca a importância do número de árvores por hectare na determinação da produção total de biomassa e, consequentemente, da remoção e armazenamento de carbono (Nagar et al. 2015). No entanto, esse efeito pode ter limites dependendo da competição entre as árvores. Assim, a quantidade de biomassa e disponibilidade de carbono depende de um conjunto de fatores locais (Zhou et al. 2017; Sanquetta et al. 2018)) entre outros fatores.

Os estoques médios de carbono de *T. vulgaris* variaram entre 0,28 e 33,42 Mg ha⁻¹, sendo que as espécies mais cultivadas como *Pinus* e *Eucalyptus* podem apresentar acúmulos

médios variando de 18,8 Mg ha⁻¹ e 47,7 Mg ha⁻¹, respectivamente, esses valores apresentam variações dependendo das condições locais, melhoramento genético e científicos amplamente consolidado (Olmedo et al. 2020). Em comparação, aos seis anos, plantios florestais de Paricá na região Amazônica em média estocam 16,7 Mg ha⁻¹ de carbono acima do solo (Neves et al. 2022).

Na pesquisa de (Ribeiro et al. 2023), os estoques de carbono em plantios de *Eucalyptus* variaram de 44,28 a 64,69 Mg ha⁻¹ aos 4 anos de idade e de 71,21 a 104,42 Mg ha⁻¹ aos 6 anos. A rápida acumulação de estoques de carbono na biomassa de *Eucalyptus* já foi observada em estudos anteriores, com taxas estimadas de 8,3 a 12,8 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ nos componentes acima do solo (Viera and Rodríguez-Soalleiro 2019). De acordo com Ribeiro et al. (2018), fatores edafoclimáticos influenciam a variação na biomassa e nos estoques de carbono em plantações de mesma idade e espaçamento. Esses resultados podem subsidiar estudos sobre a comercialização de créditos de carbono, que representam uma oportunidade de renda extra para o silvicultor, especialmente em um mercado em expansão.

Dessa forma, a adoção por espécies nativas nas plantações florestais na região Amazônica, pode representar uma estratégia eficaz para o reflorestamento de áreas degradadas e alteradas, além de poder contribuir para a viabilidade econômica e mitigações das mudanças climáticas. Em casos de plantações com finalidades comerciais podem oferecer uma alternativa economicamente viável para pequenos produtores, promovendo a diversificação produtiva e a sustentabilidade do setor florestal (Qasim et al., 2020). No entanto, os resultados obtidos para o plantio de *T. vulgaris* poderiam ter sido superiores. Isso se deve, em grande parte, à implementação de tratos silviculturais, que é essencial para otimizar o crescimento da espécie e maximizar a produção de biomassa.

Diante desse cenário, torna-se evidente a necessidade de aperfeiçoar as técnicas de manejo para *T. vulgaris* e ir ampliando as pesquisas voltadas à sua silvicultura, que ainda estão sendo desenvolvidas. Considerando o potencial produtivo da espécie, que as plantações atuais ou futuras possam expressar sua máxima capacidade de crescimento. Dessa forma, o contínuo estudos que avaliem aspectos como espaçamento, regime de desbaste, condições ambientais e fertilizantes possam contribuir para o incremento da produtividade e da biomassa, resultando, consequentemente, em um maior sequestro de carbono nos plantios (Olmedo et al. 2020).

Nesse contexto, pesquisas que quantifiquem a biomassa e o estoque de carbono em plantações florestais na Amazônia são fundamentais, especialmente aquelas que analisam os efeitos das condições edafoclimáticas e das práticas silviculturais sobre o desenvolvimento das espécies. Além disso, tais estudos podem fornecer subsídios para reduzir a pressão sobre

florestas naturais, promovendo alternativas sustentáveis para a produção de madeira e outros produtos florestais.

Os resultados indicam que a espécie apresenta ampla adaptabilidade a diferentes condições de solo e clima, o que sugere seu potencial para uso em extensas áreas do território nacional e em outras regiões tropicais com características ambientais semelhantes.

5 Conclusão

Este estudo permitiu quantificar a biomassa e estimar o estoque de carbono em um plantio experimental de *Tachigali vulgaris*, demonstrando seu potencial como uma alternativa sustentável para a diversificação das plantações florestais na Amazônia. A análise das variáveis dendrométricas e da densidade básica da madeira revelou diferenças significativas entre as classes diamétricas, reforçando a correlação desses fatores com a capacidade de armazenamento de carbono.

Os resultados obtidos indicam que *T. vulgaris* apresenta ampla adaptabilidade a diferentes condições locais, o que sugere seu potencial para uso em grandes áreas do território nacional e em outras regiões tropicais. Além disso, os dados fornecem informações valiosas para subsidiar práticas de manejo florestal sustentável, contribuindo para o aumento da produtividade e para a mitigação das mudanças climáticas.

A relevância deste estudo reside não apenas na avaliação do crescimento e estoque de carbono da espécie, mas também na geração de conhecimento que pode auxiliar na recuperação de áreas degradadas e na redução da pressão sobre florestas naturais. Dessa forma, os resultados desta pesquisa reforçam a importância de contínuos estudos sobre silvicultura de espécies nativas, consolidando *Tachigali vulgaris* como uma alternativa viável para o sequestro de carbono em regiões tropicais.

Referências

- ABNT (2003) Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 11941: Madeira - determinação da densidade básica. Rio de Janeiro
- Alvares CA, Stape JL, Sentelhas PC, et al (2013) Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift* 22:711–728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- Bahuguna RN, Jagadish KSV (2015) Temperature regulation of plant phenological development. *Environ Exp Bot* 111:83–90. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2014.10.007>

- Barros WT, Garcia PABB, Conceição Júnior V da, et al (2024) Biomass production and nutritional efficiency in short rotation *Eucalyptus* clone plantations for energy in north-east Brazil. *South For* 86:102–114. <https://doi.org/10.2989/20702620.2024.2325998>
- Barros-junior UO, Rosário WAS, Lima MDR, et al (2022) Effects of tree spacing and forking on the modification of wood density in a trial plantation of *Tachigali vulgaris* for energy in Amazonia. *Journal of Tropical Forest Science* 34:11–23. <https://doi.org/10.26525/jtfs2022.34.1.11>
- Câmara AP, Vidaurre GB, Oliveira JCL, et al (2020) Changes in hydraulic architecture across a water availability gradient for two contrasting commercial *Eucalyptus* clones. *For Ecol Manage* 474:118380. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118380>
- Cunha TQG da, Santos AC, Novaes E, et al (2021) *Eucalyptus* expansion in Brazil: Energy yield in new forest frontiers. *Biomass Bioenergy* 144:105900. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105900>
- Elli EF, Sentelhas PC, Bender FD (2020) Impacts and uncertainties of climate change projections on *Eucalyptus* plantations productivity across Brazil. *For Ecol Manage* 474:118365. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118365>
- Elli EF, Sentelhas PC, Freitas CH de, et al (2019) Assessing the growth gaps of *Eucalyptus* plantations in Brazil – Magnitudes, causes and possible mitigation strategies. *For Ecol Manage* 451:117464. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117464>
- Fagundes FFA, Reis FY da S, Martins FB (2021) A model for predicting the initial development of two native forest species under current and future climates. *Environ Exp Bot* 192:104662. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2021.104662>
- Fearnside PM (2021) The intrinsic value of Amazon biodiversity. *Biodivers Conserv* 30:1199–1202
- Ferreira EB, Cavalcanti PP, Nogueira DA (2021) ExpDes.pt: Pacote experimental designs (Portuguese)
- Florêncio GWL, Martins FB, Fagundes FFA (2022) Climate change on *Eucalyptus* plantations and adaptive measures for sustainable forestry development across Brazil. *Ind Crops Prod* 188:115538. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115538>
- Flores BM, Montoya E, Sakschewski B, et al (2024) Critical transitions in the Amazon forest system. *Nature* 626:555–564. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06970-0>
- Gonçalves JLM, Alvares CA, Rocha JHT, et al (2017) *Eucalyptus* plantation management in regions with water stress. *South For* 79:169–183
- Guimarães ZTM, Santos VAHF dos, Nogueira WLP, et al (2018) Leaf traits explaining the growth of tree species planted in a Central Amazonian disturbed area. *For Ecol Manage* 430:618–628. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.08.048>
- IBÁ (2024) Brazilian Tree Industry. IBÁ Annual Report 2024. IBÁ, São Paulo. 99

- INMET (2024) National Institute of Meteorology. INMET Meteorological Database. <https://bdmep.inmet.gov.br/>. Accessed 30 Jun 2024
- Lima RB de, Bufalino L, Alves Júnior FT, et al (2017) Diameter distribution in a Brazilian tropical dry forest domain: Predictions for the stand and species. *An Acad Bras Cienc* 89:1189–1203. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201720160331>
- Lima JP da C, Leão JRA (2013) Dinâmica de Crescimento e Distribuição Diamétrica de Fragmentos de Florestas Nativa e Plantada na Amazônia Sul Ocidental. *Floresta e Ambiente* 20:70–79. <https://doi.org/10.4322/floram.2012.065>
- Lima MDR, Moraes LG, Silva R de CC, et al (2023) *Tachigali vulgaris* energy forests: understanding spacing, age, and stem type effects on tree growth patterns and wood density. *New For (Dordr)* 54:491–513. <https://doi.org/10.1007/s11056-022-09932-y>
- Liu Y, Zhou L, Zhu Y, Liu S (2020) Anatomical features and its radial variations among different *Catalpa bungei* clones. *Forests* 11:824. <https://doi.org/10.3390/f11080824>
- Machado S do A, Figueiredo Filho A (2014) *Dendrometria*, 2nd edn. UNICENTRO, Guarapuava
- Marengo JA, Souza CM, Thonicke K, et al (2018) Changes in Climate and Land Use Over the Amazon Region: Current and Future Variability and Trends. *Front Earth Sci (Lausanne)* 6:228
- Martins FB, Benassi RB, Torres RR, Brito Neto FA de (2022) Impacts of 1.5 °C and 2 °C global warming on *Eucalyptus* plantations in South America. *Science of the Total Environment* 825:153820. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153820>
- Mascarenhas ARP, Scoti MSV, Melo RR de, et al (2021) Characterization of wood from *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* Huber × *Ducke* trees from a multi-stratified agroforestry system established in the Amazon rainforest. *Agroforestry Systems* 95:475–486. <https://doi.org/10.1007/s10457-020-00576-5>
- Melo EASC, Gonçalves JL de M, Rocha JHT, et al (2016) Responses of clonal *Eucalyptus* plantations to N, P and K fertilizer application in different edaphoclimatic conditions. *Forests* 7:0002. <https://doi.org/10.3390/f7010002>
- Moraes LG, Lima MDR, Pereira GA, et al (2023) Forking and planting spacing impacts on wood density, X-ray density, and heartwood proportion of *Tachigali vulgaris*. *Trees - Structure and Function* 37:1567–1581. <https://doi.org/10.1007/s00468-023-02443-z>
- Neves AHB, Oliveira AC de, Ataides GC, et al (2022) Biomassa e carbono em plantio comercial de Paricá na Amazônia. *Nativa* 10:154–162. <https://doi.org/10.31413/nativa.v10i2.13330>
- Oliveira IR de, Chagas MP, Bouillet JP, et al (2018) Effect of tree spacing on growth and wood density of 38-year-old *Cariniana legalis* trees in Brazil. *South For* 80:311–318. <https://doi.org/10.2989/20702620.2017.1393741>

- Oliveira R de S, Santos LTV, Melo SC, et al (2021) Wood energy yield for *Eucalyptus* clones growing under seasonal drought-stress in Brazil. *Biomass Bioenergy* 154:106264. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106264>
- Olmedo GF, Guevara M, Gilabert H, et al (2020) Baseline of carbon stocks in *pinus radiata* and *Eucalyptus* spp. Plantations of Chile. *Forests* 11:1063. <https://doi.org/10.3390/f11101063>
- Orellana BBM, Vale AT do, Gonçalves J, et al (2018) Produtividade energética da madeira de *Tachigali vulgaris* por classe diamétrica em plantios experimentais na Amazônia. 6:773–781. <https://doi.org/10.31413/nativa.v6i0.5130>
- Ortega Rodriguez DR, Tomazello-Filho M (2019) Clues to wood quality and production from analyzing ring width and density variabilities of fertilized *Pinus taeda* trees. *New For (Dordr)* 50:821–843. <https://doi.org/10.1007/s11056-018-09702-9>
- Palermo GP de M, Latorraca JV de F, Carvalho AM, et al (2015) Anatomical properties of *Eucalyptus grandis* wood and transition age between the juvenile and mature woods. *European Journal of Wood and Wood Products* 73:775–780. <https://doi.org/10.1007/s00107-015-0947-4>
- Palheta LF, Simões PHO, Neves RLP, et al (2024) Influence of meteorological variables on the development in plantation of *Tachigali vulgaris* L.G. Silva & H.C. Lima (tachi-branco). *Italian Journal of Agrometeorology* 2024:109–117. <https://doi.org/10.36253/ijam-2136>
- Poleto GC, Santos KF dos, Ludvichak AA, et al (2020) Aboveground biomass of a *Eucalyptus* hybrid subjected to two water regimes. *Revista Brasileira de Ciencias Agrarias* 15:1–6. <https://doi.org/10.5039/agraria.v15i3a7978>
- Pryde EC, Holland GJ, Watson SJ, et al (2015) Conservation of tropical forest tree species in a native timber plantation landscape. *For Ecol Manage* 339:96–104. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.11.028>
- R Core Team (2023) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing
- Ramananantoandro T, Ramanakoto MF, Rajoelison GL, et al (2016) Influence of tree species, tree diameter and soil types on wood density and its radial variation in a mid-altitude rainforest in Madagascar. *Ann For Sci* 73:1113–1124. <https://doi.org/10.1007/s13595-016-0576-z>
- Rawat M, Arunachalam K, Arunachalam A, et al (2019) Associations of plant functional diversity with carbon accumulation in a temperate forest ecosystem in the Indian Himalayas. *Ecol Indic* 98:861–868. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.12.005>
- Resende RT, Soares AAV, Forrester DI, et al (2018) Environmental uniformity, site quality and tree competition interact to determine stand productivity of clonal *Eucalyptus*. *For Ecol Manage* 410:76–83. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.12.038>
- Resquin F, Duque-Lazo J, Acosta-Muñoz C, et al (2020) Modelling current and future potential habitats for plantations of *Eucalyptus grandis* hill ex maiden and *E. dunnii* Maiden in Uruguay. *Forests* 11:948. <https://doi.org/10.3390/f11090948>

- Ribeiro FP, Gatto A, Oliveira AD de, et al (2023) Carbon Storage in Different Compartments in *Eucalyptus* Stands and Native Cerrado Vegetation. *Plants* 12:2751. <https://doi.org/10.3390/plants12142751>
- Ribeiro SC, Soares CPB, Fehrmann L, et al (2015) Aboveground and belowground biomass and carbon estimates for clonal *Eucalyptus* trees in southeast Brazil. *Revista Arvore* 39:353–363. <https://doi.org/10.1590/0100-67622015000200015>
- Romero FMB, Novais T de NO, Jacovine LAG, et al (2024) Wood Basic Density in Large Trees: Impacts on Biomass Estimates in the Southwestern Brazilian Amazon. *Forests* 15:734. <https://doi.org/10.3390/f15050734>
- Rousseau GX, Silva PR dos S, Celentano D, Carvalho CJR de (2014) Macrofauna do solo em uma cronosequência de capoeiras, florestas e pastos no centro de endemismo belém, Amazônia oriental. *Acta Amazon* 44:499–512. <https://doi.org/10.1590/1809-4392201303245>
- Sanquetta CR, Dalla Corte AP, Pelissari AL, et al (2018) Dynamics of carbon and CO₂ removals by Brazilian forest plantations during 1990–2016. *Carbon Balance Manag* 13:1–12. <https://doi.org/10.1186/s13021-018-0106-4>
- Sanquetta MNI, Sanquetta CR, Mognon F, et al (2016) Wood density and carbon content in young teak individuals from Pará, Brazil. *Científica* 44:608. <https://doi.org/10.15361/1984-5529.2016v44n4p608-614>
- Schwerz F, Neto DD, Caron BO, et al (2020) Biomass and potential energy yield of perennial woody energy crops under reduced planting spacing. *Renew Energy* 153:1238–1250. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.02.074>
- Sette-junior CR, Oliveira IR de, Tomazello-Filho M, et al (2012) Efeito da idade e posição de amostragem na densidade e características anatômicas da madeira de *Eucalyptus grandis*
- Silva MO dos S, Silva MG da, Bufalino L, et al (2021) Variations in productivity and wood properties of Amazonian tachi-branco trees planted at different spacings for bioenergy purposes. *J For Res (Harbin)* 32:211–224. <https://doi.org/10.1007/s11676-019-01068-8>
- Simões PHO, Paula MT de, Araújo DG de, et al (2022) Biological use coefficient of biomass of *Tachigali vulgaris* under phosphorus and potassium fertilization: Management technologies for sustainable production of bioenergy in tropical countries. *Aust J Crop Sci* 16:637–648. <https://doi.org/10.21475/ajcs.22.16.05.p3607>
- Sousa VG de, Brienza Junior S, Barbosa MG, et al (2016) Taxi-branco (*Tachigali vulgaris* L.F. Gomes da Silva & H.C. Lima): botânica, ecologia e silvicultura. *EMBRAPA* 1:1–14
- Stallbaun PH, Baraúna EEP, Monteiro TC, et al (2017) Resistência natural da madeira de *Tachigali vulgaris* ao fungo xilófago *Postia placenta*. *Pesqui Florest Bras* 36:459. <https://doi.org/10.4336/2016.pfb.36.88.1231>
- Teixeira RAC, Lima MDR, Silva AR, et al (2024) Dynamics of experimental plantations of *Tachigali vulgaris* in response to fertilization and soil texture. *New For (Dordr)* 55:713–733. <https://doi.org/10.1007/s11056-023-09999-1>

- Trugilho PF (2009) Densidade Básica e estimativa de massa seca e de lignina na madeira em espécies de *Eucalyptus*. Lavras
- Vendruscolo DGS, Cerqueira CL, Madi JPS, et al (2020) Temporal changes in the diametric distribution of teak in different spacings. *Nativa* 8:210–215. <https://doi.org/10.31413/nativa.v8i2.8145>
- Viera M, Rodríguez-Soalleiro R (2019) A complete assessment of carbon stocks in above and belowground biomass components of a hybrid eucalyptus plantation in southern Brazil. *Forests* 10:536. <https://doi.org/10.3390/f10070536>
- Williamson GB, Wiemann MC (2010) Age-Dependent Radial Increases in Wood Specific Gravity of Tropical Pioneers in Costa Rica. *Biotropica* 42:590–597. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2009.00618.x>