



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
SERTÃO PERNAMBUCANO
CAMPUS PETROLINA ZONA RURAL

CURSO DE BACHARELADO EM AGRONOMIA

**LEVANTAMENTO DA BIOMASSA LENHOSA EM PÉ E O
RESPECTIVO CARBONO SEQUESTRADO NA CULTURA DA
MANGA (*Mangifera indica* L) NO SUBMÉDIO DO VALE DO SÃO
FRANCISCO**

JEFERSON FELICIANO PEREIRA

PETROLINA – PE
2025

JEFERSON FELICIANO PEREIRA

**LEVANTAMENTO DA BIOMASSA LENHOSA EM PÉ E O
RESPECTIVO CARBONO SEQUESTRADO NA CULTURA DA
MANGA (*Mangifera indica* L) NO SUBMÉDIO DO VALE DO SÃO
FRANCISCO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao IFSERTÃOPE *Campus*
Petrolina Zona Rural, exigido para a obtenção
do título de Engenheiro Agrônomo.

Orientador: Prof. Dr. Júlio César Sobreira Ferreira

PETROLINA – PE
2025

P436 Pereira, Jeferson Feliciano.

Levantamento da biomassa lenhosa em pé e o respectivo carbono sequestrado na cultura da manga (*Mangifera indica* L.) no submédio do Vale do São Francisco / Jeferson Feliciano Pereira. - Petrolina, 2025.
63 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano, Campus Petrolina Zona Rural, 2025.

Orientação: Prof. Dr. Júlio César Sobreira Ferreira.

1. Ciências Agrárias. 2. Carbono equivalente. 3. Vale do São Francisco. 4. Mangueira. 5. Fruticultura irrigada. I. Título.

CDD 630

JEFERSON FELICIANO PEREIRA

**LEVANTAMENTO DA BIOMASSA LENHOSA EM PÉ E O
RESPECTIVO CARBONO SEQUESTRADO NA CULTURA DA
MANGA (*Mangifera indica* L) NO SUBMÉDIO DO VALE DO SÃO
FRANCISCO**

Trabalho de Conclusão do Curso
apresentado ao IFSERTÃOPE *Campus*
Petrolina Zona Rural, exigido para a obtenção
de título de Engenheiro Agrônomo.

Aprovado em: 02 de dezembro de 2025.

Prof. Dr. Júlio César Sobreira Ferreira (Orientador)
IFSertãoPE, Campus Petrolina Zona Rural

Professor Dr. Silver Jonas Alves Farfan
IFSertãoPE, Campus Petrolina Zona Rural

Profa. Dra. Elizângela Maria de Souza
IFSertãoPE, Campus Petrolina Zona Rural

Dedico este trabalho a Deus, que sempre guiou meus passos e me concedeu força, sabedoria e perseverança ao longo desta caminhada, aos meus pais, que sempre estiveram ao meu lado, que me apoiaram e foram pilares para que eu pudesse finalizar este curso, aos meus irmãos e todos que acreditaram, torceram e contribuíram, direta ou indiretamente, para o desenvolvimento e o sucesso deste trabalho, minha sincera gratidão, ainda que não seja possível nomear todos neste breve texto.

Agradecimentos

A Deus, pela vida, pelas maravilhas que me concede diariamente, por me manter firme no desenvolvimento deste trabalho e por guiar cada passo da minha trajetória acadêmica e pessoal.

Aos meus pais, José Feliciano Pereira e Francisca Pereira, que são as pessoas que mais amo e respeito no mundo, e a quem devo a minha gratidão por terem me feito ser quem sou hoje.

Aos meus irmãos, que nunca mediram esforços para que a conclusão deste curso se tornasse realidade, e que sempre estiveram ao meu lado, apoiando-me até a chegada deste momento.

Ao Gabriel Rodrigues do Amaral Silva, que foi um verdadeiro tutor, acompanhando-me desde o início na elaboração, desenvolvimento e finalização deste trabalho, que muito além disso, dedicou-se a não me deixar desistir.

Ao excelentíssimo professor e orientador, Dr. Júlio Cesar Sobreira Ferreira, pelo auxílio exemplar, pelas orientações criteriosas, pelas idas ao campo, pelas reuniões noturnas e por toda dedicação à metodologia e ao andamento deste trabalho.

Ao Joseildo Alves da Cruz Coelho e a João Henrique Alves da Cruz Coelho, grandes parceiros que contribuíram nas coletas de dados em campo e tornaram essa etapa mais leve e possível.

A Laura Beatriz, cuja ajuda foi indispensável, desde viabilizar a área para o desenvolvimento do trabalho até facilitar autorizações e idas à fazenda. Sua prestatividade e fé no projeto desde o início fizeram toda a diferença.

À Fazenda Frutivita - Grupo Finobrasa, representada pelo Sr. Edson Pereira, que foi um grande parceiro e nos depositou confiança ao abrir as portas da empresa para que este projeto pudesse ser desenvolvido.

À turma AG19, sempre lembrada pelas resenhas, pela parceria e pela força coletiva que fez toda a jornada valer a pena.

Ao curso de Agronomia e ao IFSETEÓPE, pela oportunidade de formação, pelas experiências valiosas e pelos desafios que me ajudaram a crescer.

Às amigas construídas ao longo desse processo, que levarei comigo para a vida.

Ao Agrofarma, e todos que o compõem.

“Consagre ao Senhor tudo o que você faz,
e os seus planos serão bem-sucedidos.”
(*Provérbios 16:3*)

RESUMO

A fruticultura irrigada no Vale do São Francisco desempenha papel fundamental na economia regional, mas também impõe desafios ambientais relacionados ao uso intensivo de recursos e nas emissões associadas ao manejo agrícola. Nesse cenário, espécies perenes como a mangueira (*Mangifera indica* L.) apresentam elevado potencial para o sequestro de carbono, atuando como sumidouros capazes de mitigar parte das emissões de CO₂ dos sistemas produtivos. Este estudo teve como objetivo quantificar a biomassa lenhosa em pé e o dióxido de carbono equivalente (CO₂eq) estocado em um pomar comercial de *M. indica* localizado no Submédio do Vale do São Francisco. Foram avaliadas 216 árvores adultas por meio de métodos dendrométricos não destrutivos, permitindo estimar volume de madeira, biomassa seca, carbono orgânico e CO₂eq. Nas 216 plantas avaliadas, foram quantificados 18,56 t de biomassa, 9,28 t de carbono e 34,06 t de CO₂eq, com médias individuais de 85,95 kg de biomassa, 42,98 kg de carbono e 157,72 kg de CO₂eq por árvore. Ao projetar os resultados para a área total do pomar, composta por 1001 árvores distribuídas em 3,5 hectares, estimam-se 86,04 t de biomassa, 43,02 t de carbono e 157,88 t de CO₂eq acumulados. Esses valores demonstram que pomares de mangueira em regiões semiáridas irrigadas possuem expressiva capacidade de sequestro de carbono, contribuindo de forma relevante para estratégias de mitigação das mudanças climáticas e promovendo sistemas agrícolas mais sustentáveis.

Palavras-chave: Carbono equivalente; Vale do São Francisco; Mangueira; Fruticultura irrigada; Crédito de carbono.

ABSTRACT

Irrigated fruit production in the São Francisco Valley plays a fundamental role in the regional economy, but it also poses environmental challenges related to the intensive use of resources and the emissions associated with agricultural management. In this context, perennial species such as mango trees (*Mangifera indica* L.) have a high potential for carbon sequestration, functioning as sinks capable of mitigating part of the CO₂ emissions from production systems. This study aimed to quantify standing woody biomass and the equivalent carbon dioxide (CO₂eq) stored in a commercial *M. indica* orchard located in the Sub-Middle São Francisco Valley. A total of 216 adult trees were evaluated using non-destructive dendrometric methods, allowing estimates of wood volume, dry biomass, organic carbon, and CO₂eq. In the 216 assessed trees, 18.56 t of biomass, 9.28 t of carbon, and 34.06 t of CO₂eq were quantified, with individual averages of 85.95 kg of biomass, 42.98 kg of carbon, and 157.72 kg of CO₂eq per tree. When projecting the results to the total orchard area, composed of 1001 trees distributed over 3.5 hectares, an estimated 86.04 t of biomass, 43.02 t of carbon, and 157.88 t of CO₂eq were accumulated. These findings demonstrate that mango orchards in irrigated semiarid regions have a significant capacity for carbon sequestration, contributing meaningfully to climate-change mitigation strategies and promoting more sustainable agricultural systems.

Key words: Carbon equivalent; São Francisco Valley; Mango tree; Irrigated fruit production; Carbon credit.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
2 OBJETIVOS.....	13
2.1 Objetivo geral.....	13
2.2 Objetivos específicos.....	13
3 REFERENCIAL TEÓRICO.....	14
3.1 <i>M. indica</i> L.: aspectos botânicos e importância agrícola	14
3.2. Biomassa arbórea e compartimentos estruturais	15
3.3 Densidade básica da madeira: conceitos e relevância.....	16
3.4. Métodos volumétricos e fator de forma.....	17
3.5. Equações alométricas na estimativa de biomassa arbórea	18
3.6. Teor de carbono na madeira e composição química.....	20
3.7. Conversão do carbono para dióxido de carbono equivalente (CO ₂ eq).....	22
3.8. Sistemas irrigados, ambientes semiáridos e relação com biomassa e carbono	22
3.9. Papel ambiental da fruticultura irrigada na mitigação climática.....	23
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	25
4.1 Área experimental.....	25
4.2 Circunferências e Diâmetros	29
4.2.1 Cálculo do Diâmetro equivalente	31
4.3 Altura	32
4.4 Tabulação dos dados	33
4.4.1 Quantificação do Volume de madeira.....	33
4.4.2 Determinação da densidade básica da madeira	34
4.4.3 Quantificação da Biomassa	41
4.4.4 Quantificação do Carbono	43
4.4.5 Quantificação do dióxido de carbono equivalente (CO ₂ eq).....	44
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	45

5.1 Distribuição dos Diâmetros Equivalentes à Altura do Peito (DAP).....	45
5.2 Distribuição de Altura.....	47
5.3 Resultados Volume.....	49
5.4 Densidade Básica da Madeira de <i>M. indica</i>	49
5.5 Resultados biomassa	51
5.6 Resultados Carbono	52
5.7 Resultados CO ₂ equivalente	53
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	56
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	57

1 INTRODUÇÃO

A fruticultura praticada no Vale do São Francisco, embora seja uma das principais atividades econômicas regionais, exerce grande impacto ambiental. Entre os principais desafios observados, destacam-se o elevado consumo de água para irrigação, a contaminação do solo e dos recursos hídricos decorrentes do uso excessivo de agroquímicos, bem como a redução da biodiversidade em áreas submetidas ao desmatamento (Oliveira, 2008).

Além disso, práticas inadequadas de manejo agrícola podem intensificar a emissão de gases de efeito estufa, contribuindo para o agravamento das mudanças climáticas. Nesse contexto, torna-se essencial a adoção de estratégias de produção sustentáveis que conciliem os benefícios econômicos e sociais à preservação ambiental (Perosa, 2020).

A mangueira (*Mangifera indica* L.), pertencente à família Anacardiaceae e originária do Sul da Ásia, destaca-se como uma das culturas de maior relevância para o Submédio do Vale do São Francisco, em agosto de 2025, o emprego na cultura da manga empregou um total de 14.454 pessoas (Embrapa, 2025) corroborando o papel da fruticultura como motor regional ao gerar aproximadamente 240 mil empregos diretos no campo e movimentar em torno de R\$ 2 bilhões ao ano (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA, 2023). Em 2024, o Brasil registrou recorde histórico nas exportações de manga, com faturamento estimado em 349 milhões de dólares (Abrafrutas, 2025), evidenciando a expressiva importância socioeconômica da atividade.

Além de seu valor comercial, a *M. indica* L. desempenha papel ambiental relevante, atuando como sumidouro de carbono atmosférico. O processo de crescimento vegetal permite a captura de CO₂, que é armazenado tanto na biomassa quanto no solo. A homogeneidade estrutural dos pomares de manga favorece a obtenção de dados mais precisos e monitoramentos consistentes sobre o carbono assimilado (RIBEIRO, 2018). Estudos conduzidos na região do Submédio do Vale do São Francisco indicam que o manejo adequado pode elevar os estoques de carbono em sistemas produtivos, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas e a conservação dos recursos edáficos (Barros *et al.*, 2019).

O aquecimento global decorre do aumento da temperatura média do planeta, ocasionado principalmente pela intensificação do efeito estufa. Esse fenômeno resulta da retenção de radiação infravermelha por gases atmosféricos como dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O) (IPCC, 2023). O crescente incremento da concentração desses gases, sobretudo do CO_2 , está diretamente associado às atividades antropogênicas, como a queima de combustíveis fósseis, desmatamento e práticas agrícolas de manejo intensivo (Embrapa, 2024).

Nesse sentido, as árvores exercem função fundamental na redução da concentração de gases de efeito estufa, uma vez que assimilam CO_2 atmosférico e o incorporam à biomassa ao longo de seu desenvolvimento (BRIANEZI *et al.*, 2013). O carbono retido permanece predominantemente armazenado nos tecidos vegetais (RIBEIRO *et al.*, 2010; BRIANEZI *et al.*, 2013). Guimarães (2024) complementa afirmando que os estoques de biomassa e, conseqüentemente, de carbono variam significativamente entre as diferentes formações florestais presentes nos biomas brasileiros, refletindo características edafoclimáticas e estruturais próprias de cada ambiente.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Realizar levantamento da biomassa lenhosa em pé e do carbono sequestrado pela espécie da mangueira (*M. indica*) em uma fazenda localizada no submédio do Vale do São Francisco.

2.2 Objetivos específicos

- Determinar o volume e a densidade da biomassa lenhosa das mangueiras da variedade Kent da área estudada.
- Estimar o volume de carbono sequestrado pelas plantas através das medições dendrométricas.

- Avaliar a relação entre o diâmetro do tronco, altura (h) da planta e volume de biomassa lenhosa, visando estabelecer equações alométricas específicas para a cultura da mangueira.
- Comparar os valores de biomassa e carbono obtidos com valores de modelos alométricos propostos para espécies frutíferas e florestais.
- Analisar o potencial de sequestro de carbono da mangueira em sistemas produtivos do Submédio do Vale do São Francisco, relacionando-o às condições edafoclimáticas regionais.
- Contribuir para a geração de dados que subsidiem estratégias de manejo sustentável e mitigação de emissões de gases de efeito estufa na fruticultura irrigada.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 *M. indica* L.: aspectos botânicos e importância agrícola

A *M. indica* L., pertencente à família Anacardiaceae, é uma das espécies frutíferas perenes de maior relevância agrônoma no mundo. Originária do sul e sudeste asiático, principalmente da Índia e Myanmar, a mangueira foi difundida globalmente devido à sua elevada adaptabilidade e ao valor econômico de seus frutos (Tropical Plants Database, 2024). Quanto aos aspectos morfológicos, suas folhas são simples, alternas e coriáceas, com nervura central bem marcada e coloração que varia do vermelho-púrpura, quando jovens, ao verde-brilhante na fase adulta. A inflorescência ocorre em panículas terminais, contendo centenas ou milhares de flores, predominando as estéreis. Essa condição, associada às variações climáticas e ao manejo, fazem com que a taxa de frutificação seja relativamente baixa (Perosa, 2020).

Trata-se de uma árvore de porte médio a grande, podendo atingir entre 10 e 45 metros de altura, com copa densa, raízes profundas e tronco robusto, características que favorecem seu cultivo em diferentes condições edafoclimáticas.

Além da importância botânica, a mangueira desempenha papel fundamental na economia agrícola brasileira, especialmente no Vale do São Francisco, onde se destaca como uma das principais culturas de exportação. O polo de fruticultura irrigada dessa região é responsável por grande parte da

produção nacional, beneficiando-se de condições climáticas favoráveis, elevada insolação e sistemas avançados de irrigação (IBRAF, 2023). O cultivo perene e a longevidade dos pomares fazem da mangueira uma espécie de interesse crescente em estudos de sequestro de carbono, dada sua capacidade acumulativa ao longo dos anos.

3.2. Biomassa arbórea e compartimentos estruturais

A biomassa arbórea corresponde ao total de matéria orgânica acumulada nos diferentes componentes da planta, incluindo tronco, ramos, folhas e raízes. É um indicador essencial para o entendimento do crescimento vegetal, da produtividade ecossistêmica e do potencial de sequestro de carbono. Nesse contexto, o acúmulo de biomassa vegetal depende de fatores fisiológicos, ambientais e de manejo, incluindo disponibilidade hídrica, radiação solar, fenologia, idade da planta e práticas de adubação (Clark *et al.*, 2001). A biomassa aérea é, em geral, o principal reservatório de carbono das árvores tropicais, com o tronco representando a maior parcela devido à predominância de tecidos lignificados (Brown, 1997; Chave *et al.*, 2005).

Em sistemas irrigados, especialmente em regiões semiáridas, ocorre aumento significativo da taxa de crescimento e do incremento periódico anual do fuste, resultando em maior acúmulo de biomassa lenhosa (Giongo *et al.*, 2022). Diante dessa realidade, a quantificação da biomassa torna-se fundamental para inventários florestais, estudos de produtividade agrícola e estimativas de carbono. Métodos diretos, como corte e pesagem, são altamente precisos, porém inviáveis em pomares comerciais. Por isso, o uso de métodos indiretos como volumetria, densidade da madeira e equações alométricas, torna-se essencial para análises práticas e aplicadas (IPCC, 2006).

3.3 Densidade básica da madeira: conceitos e relevância

A densidade básica da madeira é definida como a relação entre a massa seca e o volume saturado da amostra, sendo um dos parâmetros físicos mais importantes para estudos de biomassa, propriedades tecnológicas e estoque de carbono (Foelkel, 2009). Por isso, a densidade é reconhecida como o melhor preditor da variação estrutural entre espécies arbóreas tropicais, estando diretamente associada ao valor energético, à resistência mecânica e à eficiência no armazenamento de carbono (Zobel & van Buijtenen, 1989; Fearnside, 1997). Trata-se de uma característica altamente influenciada pela anatomia da madeira e pela proporção entre seus componentes estruturais, como celulose, hemicelulose e lignina, sendo esta última a principal responsável pelo aumento da densidade e pelo maior teor de carbono nos tecidos lenhosos (Santos *et al.*, 2018; Rezende *et al.*, 2020).

No contexto das equações alométricas, a densidade básica é frequentemente incorporada como variável explicativa para aumentar a precisão das estimativas de biomassa acima do solo, especialmente em espécies tropicais com grande variabilidade anatômica (Chave *et al.*, 2005; Chave *et al.*, 2014).

No caso de *M. indica*, estudos reportam densidade média variando entre 0,45 e 0,65 g cm⁻³, dependendo da idade do fuste, do crescimento radial, das condições edafoclimáticas e do manejo adotado (FAO, 2016; The Wood Database, 2024). Esse intervalo permite classificar a madeira da mangueira como moderadamente densa, o que está de acordo com sua anatomia típica de espécie frutífera tropical com padrão de lignificação acentuado. Em pomares irrigados, como os do Submédio São Francisco, o balanço hídrico favorável tende a aumentar o crescimento secundário, podendo resultar em variações sutis na densidade da madeira ao longo da idade da planta.

A densidade básica também desempenha papel central na transformação de volume em massa seca, etapa essencial para cálculos de biomassa lenhosa e de carbono. Segundo o IPCC (2006), quando não há valores específicos para uma espécie, o uso de médias de densidade provenientes de bases globais (como FAO ou Global Wood Density Database) é aceitável, desde que acompanhado de incerteza

explícita. No entanto, para a mangueira, já existem valores consolidados na literatura, o que garante maior confiabilidade às estimativas em pomares comerciais.

3.4. Métodos volumétricos e fator de forma

A mensuração do volume de árvores é um dos procedimentos mais antigos e fundamentais da dendrometria. Em seu método tradicional (destrutivo), o tronco é seccionado em toras, e o volume é calculado com base nas fórmulas geométricas clássicas de Smalian, Huber e Newton, amplamente descritas por Husch, Beers & Kershaw (2003) e Machado *et al.* (2006), onde Smalian utiliza as áreas das extremidades da tora, Huber utiliza a área da seção transversal no meio da tora e Newton combina Smalian e Huber, sendo matematicamente o mais preciso.

Entretanto, quando se trabalha com cultivos comerciais, esses métodos se tornam impraticáveis, pois requerem o abate das árvores. Consequentemente, a estimativa volumétrica indireta torna-se a alternativa mais viável e amplamente utilizada. Nesse contexto, o fator de forma (f) é uma ferramenta essencial. Ele expressa a relação entre o volume real do tronco (V_{real}) e o volume do cilindro teórico calculado a partir da circunferência à altura do peito (CAP) e da altura total (Avery & Burkhart, 2002) sendo usada para estimar o quão próximo o tronco de uma árvore se assemelha a um cilindro perfeito. Ela corrige o produto entre a área basal e a altura total, considerando as variações naturais do afilamento do tronco.

Equação 1 – Fórmula para cálculo de fator de forma, onde: f = Fator de forma; V_{real} = Volume real da árvore (obtido por cubagem rigorosa ou equação volumétrica); $\pi \cdot r^2$ = Área basal (g); r = Raio da árvore a 1,30 m do solo (DAP/2); h = Altura total da árvore

$$f = \frac{V_{real}}{\pi \cdot r^2 \cdot h}$$

Fonte - Avery & Burkhart, (2002)

Essa correção é necessária porque o tronco das árvores apresenta afunilamento natural, o que torna o volume real menor que o volume cilíndrico perfeito.

Em árvores tropicais, o fator de forma (ff) pode variar substancialmente de acordo com espécie, idade, densidade do povoamento e forma do fuste. Além disso, o fator é uma opção antiga que deve ser utilizada nas situações em que não se tenha nenhuma informação sobre a forma da árvore ou, ainda, quando for necessário rapidez no trabalho de inventário. Ele fornece estimativas confiáveis, desde que se controle a tipologia florestal, espécie e classe diamétrica (FIGUEIREDO; SCHROEDER; PAPA, 2009, p. 2).

Revisões recentes indicam que valores típicos para fatores de forma (ff) em árvores tropicais variam, em geral, entre 0,40 e 0,70, dependendo da arquitetura da copa, grau de afilamento do tronco e condições ambientais. Essa amplitude justifica a adoção de um valor intermediário, como 0,60 para *M. indica*, por representar um compromisso adequado para espécies de porte moderado e copa relativamente compacta, permanecendo dentro dos limites observados em estudos de alometria tropical (BROWN, 1997; CHAVE *et al.*, 2014; IPCC, 2006). Em mangueiras, cuja arquitetura tende a apresentar fuste relativamente curto e ramificação precoce, o fator de forma costuma ser intermediário e relativamente constante devido à padronização dos pomares irrigados

O uso do fator de forma é amplamente aceito pela literatura, sendo recomendado para inventários em sistemas agrícolas e florestais onde não se realiza corte das árvores (Husch *et al.*, 2003). Além disso, seu uso facilita ajustes volumétricos em equações regionais e reduz erros sistemáticos na extrapolação de dados em pomares comerciais.

3.5. Equações alométricas na estimativa de biomassa arbórea

Equações alométricas são modelos matemáticos que relacionam métricas de fácil medição como CAP (Circunferência a altura do peito), diâmetro, altura e densidade da madeira, a biomassa seca da árvore. Elas são fundamentais em pesquisas de carbono, especialmente devido à inviabilidade prática e econômica de métodos destrutivos (IPCC, 2006; Sileshi, 2014).

Quanto à sua aplicação, essas equações podem ser específicas por espécie, regionais, multiespécies (pantropicais) e locais, cada uma calibrada para um ambiente ou contexto particular.

Diversos autores destacam que o CAP é a variável de maior poder preditivo da biomassa arbórea, pois integra diretamente o crescimento radial e o acúmulo de madeira ao longo do tempo (Chave *et al.*, 2005; Litton *et al.*, 2006). O acréscimo de altura e densidade da madeira tende a refinar os modelos, aumentando a acurácia, especialmente em árvores de grande porte.

Entre os modelos mais utilizados no mundo estão os propostos por Chave *et al.* (2014), que incorporam densidade básica (ρ), CAP (ou diâmetro) e altura (H):

Equação 2 - Fórmula para cálculo de circunferência à altura do peito.

$$AGB = 0,0673 \times (\rho \times D^2 \times H)^{0,976}$$

Fonte - Chave *et al.* (2014)

Onde:

- **AGB** = biomassa aérea total da árvore (kg);
- **ρ (rho)** = densidade básica da madeira da espécie (g/cm³);
- **D** = diâmetro à altura do peito (DAP), medido a 1,30 m do solo (cm);
- **H** = altura total da árvore (m);
- **0,0673** = coeficiente ajustado estatisticamente por Chave *et al.* (2014);
- **0,976** = expoente alométrico que ajusta a relação entre densidade, dimensões e biomassa.

Esses modelos são amplamente aceitos internacionalmente e usados em inventários de carbono em ecossistemas tropicais. Para espécies cultivadas, como a mangueira, estudos nacionais têm ajustado modelos específicos para pomares irrigados, com boa precisão para estimativas de biomassa aérea (Pereira *et al.*, 2018; Silva *et al.*, 2020).

Além do CAP em muitos modelos alométricos e equações de volume, o diâmetro à altura do peito (DAP, ou *diameter at breast height* - DBH) é utilizado por

apresentar forte correlação com a produção de biomassa e o volume do fuste (PICARD; SAINT-ANDRÉ; HENRY, 2012). Essa medição parte da premissa de que, no ponto avaliado, a seção transversal do tronco se aproxima geometricamente de um círculo, permitindo a conversão de circunferência em diâmetro pela relação $d = c/\pi$ (MACHADO *et al.*, 2015).

A padronização internacional estabelece que a medição do diâmetro seja realizada a 1,30 m acima do solo, altura adotada em países que utilizam o sistema métrico, com o objetivo de uniformizar os dados dendrométricos e evitar distorções provocadas por irregularidades na base do tronco (PICARD; SAINT-ANDRÉ; HENRY, 2012; FAO, 2016).

A utilização do diâmetro nas atividades de mensuração florestal destaca-se pelos seguintes motivos:

- a) É uma variável de fácil medição e acesso em campo;
- b) constitui a base para cálculos de área basal, volume e estimativas de biomassa por meio de equações alométricas;
- c) permite a avaliação da densidade das formações florestais por hectare;
- d) auxilia na caracterização da estrutura da floresta, especialmente por meio da análise da distribuição diamétrica do povoamento (BURKHART; AVERY, 2013).

Inventários florestais nacionais também consideram o DAP (Diâmetro a altura do peito) como variável fundamental, sendo comum a mensuração de todos os indivíduos com DAP ≥ 10 cm, registrados a 1,30 m do solo (BRASIL, 2020).

3.6. Teor de carbono na madeira e composição química

A biomassa arbórea é composta fundamentalmente pelos elementos carbono, hidrogênio e oxigênio, sendo o carbono o principal componente da massa seca da madeira. Sua proporção média varia entre 45% e 50% da massa seca para a maioria das espécies tropicais (IPCC, 2006; Thomas & Martin, 2012). Essa variação

não é aleatória; depende da densidade da madeira, do conteúdo de lignina, da idade da árvore e das condições ambientais de crescimento (Elias; Potvin, 2013).

Madeiras com maior densidade básica tendem a apresentar maior proporção de carbono estrutural devido ao aumento do teor de lignina, polímero complexo que confere resistência e rigidez ao tecido lenhoso (Fearnside, 1997; Santos *et al.*, 2018). No caso de *M. indica*, estudos internacionais e bancos de dados globais indicam que o teor de carbono segue o padrão de espécies tropicais de densidade moderada, podendo ser adequadamente representado pelo fator de 0,47 recomendado pelo IPCC (2006).

Este teor de carbono mencionado, refere-se à quantidade de carbono atmosférico assimilado durante o processo de fotossíntese e incorporado à biomassa vegetal na forma de compostos orgânicos, como carboidratos, lignina e celulose. Durante esse processo, o dióxido de carbono (CO_2) atmosférico é absorvido pelas folhas por meio dos estômatos e, na presença de luz, água e clorofila, passa a ser convertido em compostos orgânicos no interior dos cloroplastos (TAIZ *et al.*, 2017). Inicialmente, a energia luminosa é utilizada nas reações fotoquímicas para a produção de ATP e NADPH. Em seguida, na fase bioquímica da fotossíntese (Ciclo de Calvin), o CO_2 é fixado pela enzima Rubisco e transformado em açúcares simples, principalmente trioses-fosfato (TAIZ *et al.*, 2017; RAVEN; EVERT; EICHHORN, 2014).

Esses compostos servem como base para a síntese de carboidratos estruturais, como celulose e lignina, que compõem a biomassa vegetal. Dessa forma, o carbono originalmente presente na atmosfera passa a integrar os tecidos da planta, permanecendo estocado enquanto a biomassa se mantém íntegra, especialmente em espécies perenes como a mangueira (*M. indica*).

O acúmulo de biomassa lenhosa ao longo do tempo representa um importante mecanismo de sequestro de carbono, contribuindo para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa e desempenhando papel relevante no balanço global de carbono.

3.7. Conversão do carbono para dióxido de carbono equivalente (CO₂eq)

A conversão do estoque de carbono da biomassa arbórea para dióxido de carbono equivalente baseia-se nas massas molares do carbono (12 g mol⁻¹) e do CO₂ (44 g mol⁻¹). Assim, o fator de conversão utilizado mundialmente é:

Equação 3 - Fórmula para cálculo de conversão do Carbono em Dióxido de carbono sequestrado (CO₂eq).

$$CO_{2eq} = C \times \frac{44}{12} = C \times 3,67$$

Fonte - IPCC (2006)

Esse fator expressa a quantidade de CO₂ que foi retirada da atmosfera pela árvore e incorporada à sua biomassa (EPA, 2023; European Environment Agency, 2022). Ele também é usado em auditorias ambientais, inventários de gases de efeito estufa, projetos de crédito de carbono e relatórios de impacto climático (UNFCCC, 2022).

A adoção do fator 3,67 facilita a comparação entre sistemas agrícolas e florestais e permite estimar o potencial de mitigação das culturas perenes ao longo do seu ciclo de vida. No caso da mangueira, que é uma espécie de vida longa, o acúmulo de carbono no tronco e nos ramos tende a ser contínuo e relativamente estável, aumentando a relevância dessa conversão para avaliações ambientais.

3.8. Sistemas irrigados, ambientes semiáridos e relação com biomassa e carbono

O semiárido brasileiro é caracterizado por elevadas temperaturas, baixa precipitação anual e forte estacionalidade hídrica. Em condições naturais, essas características limitam o crescimento da vegetação e reduzem o acúmulo de biomassa lenhosa. No entanto, em ambientes irrigados, como o Vale do São Francisco, as

condições microclimáticas são significativamente alteradas, promovendo aumento da produtividade primária e do crescimento arbóreo (Zanella, 2014).

A irrigação suplementar reduz o estresse hídrico e favorece a atividade cambial, resultando em maior incremento diamétrico e formação de tecido lenhoso (Giongo *et al.*, 2022). Isso implica não apenas maior produção agrícola, mas também maior potencial de sequestro de carbono. A mangueira exemplifica bem esse cenário, respondendo positivamente ao manejo irrigado, com aumento significativo de sua taxa de crescimento anual e de sua produtividade, o que contribui para maior acúmulo de biomassa e carbono ao longo dos anos.

Sistemas irrigados com fruteiras perenes apresentam estoques de biomassa superiores aos de áreas de Caatinga nativa, conforme relatado por estudos que avaliam árvores plantadas em ambientes semiáridos (Giongo *et al.*, 2022).

Dessa forma, pomares comerciais irrigados podem funcionar como sumidouros de carbono, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas e ampliando a sustentabilidade da fruticultura no semiárido.

3.9. Papel ambiental da fruticultura irrigada na mitigação climática

A fruticultura irrigada do Vale do São Francisco é reconhecida não apenas pelo seu papel econômico e social, mas também pelo potencial ambiental de suas espécies perenes. Árvores cultivadas em sistemas agrícolas intensivos podem atuar como importantes reservatórios de carbono atmosférico, especialmente quando manejadas por longos períodos (CIFOR, 2020).

Em pomares de mangueira, o ciclo de vida prolongado, o crescimento contínuo do tronco e o manejo adotado favorecem a acumulação de biomassa ao longo dos anos, especialmente em sistemas irrigados do semiárido brasileiro. Estudos desenvolvidos na região demonstram que práticas como irrigação tecnificada, adubação equilibrada, podas regulares e maior densidade de plantio contribuem para o incremento do crescimento arbóreo e para o aumento dos estoques de matéria

orgânica e carbono no sistema (RIBEIRO, 2018; CADERNOS PRS-CAATINGA, 2022).

Além disso, análises realizadas no Polo Agroindustrial Petrolina–Juazeiro evidenciam que a fruticultura irrigada apresenta elevado potencial de sequestro de carbono e desempenho ambiental favorável, configurando-se como uma estratégia relevante de mitigação das mudanças climáticas em escala regional (CARNEIRO, 2017). Em outras regiões do mundo, resultados semelhantes também têm sido observados. Na Planície Indo-Gangética, na Índia, TRIVEDI *et al.* (2025) estimaram que a quantidade de dióxido de carbono sequestrado por mangueiras variou entre 660,98 e 3.838,96 kg CO₂ por árvore. O potencial anual de sequestro de carbono por uma mangueira individual oscilou entre 30,78 e 78,30 kg árvore⁻¹ ano⁻¹, com média de 50,55 kg árvore⁻¹. Dessa forma, além de promover elevada geração de renda e empregos, os pomares de mangueira atuam como importantes sumidouros de CO₂, reforçando o papel estratégico da fruticultura irrigada no contexto do desenvolvimento sustentável no Submédio do Vale do São Francisco e no mundo.

Diante desses fatores, torna-se evidente a importância de estudos que quantifiquem a biomassa aérea, o carbono estocado e o CO₂ equivalente em sistemas frutíferos irrigados, especialmente em regiões semiáridas onde a agricultura tecnificada é predominante. Os resultados desses estudos contribuem para a compreensão do papel da agricultura no enfrentamento das mudanças climáticas e fornecem subsídios para políticas públicas e certificações ambientais.

A quantificação do carbono sequestrado por essa cultura pode oferecer dados valiosos para políticas de compensação de carbono, como os créditos de carbono, e promove a adoção de práticas agrícolas que conciliam sustentabilidade ambiental e viabilidade econômica para os produtores rurais (Giongo *et al.*, 2022).

4 MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi realizado na Fazenda Frutivita do Grupo Finoagro Agroindustrial, onde as coordenadas aproximadas são; latitude -9.328448, longitude -40.652122 localizada no Projeto Irrigado Senador Coelho – PISNC C2, Zona Rural do município de Petrolina - PE, em uma área de manga da variedade KENT com 3,5 hectares, espaçamento entre linhas de 7,0 metros, e espaçamento entre plantas de 5,0 metros, totalizando 1001 plantas ao total. A área utilizada é homogênea e foi plantada em setembro de 1997, tendo 28 anos completos. Para avaliar esse pomar, a metodologia adotada neste estudo não requereu técnicas destrutivas. Foram coletadas variáveis dendrométricas para a estimativa da biomassa lenhosa em pé, volume de madeira, carbono orgânico e carbono sequestrado, sem a necessidade de derrubada das árvores.

Nesse contexto, o estudo foi desenvolvido a partir do uso de métodos precisos de estimativa volumétrica, por meio da cubagem não destrutiva de árvores, têm sido fundamentais para o planejamento e valorização de povoamentos florestais (NICOLETTI, 2012). Considerando os diversos métodos de medição volumétrica de árvores disponíveis na literatura, os métodos indiretos se destacam como uma maneira rápida e eficaz de obter o volume das árvores, utilizando um fator de forma para essa estimativa (GOMES, 1957; CAMPOS, 1988; SCOLFORO e FIGUEIREDO FILHO, 1993; AVERY e BURKHART, 1997).

4.1 Área experimental

A área experimental possuía 3,5 hectares e foi subdividida em parcelas, cada uma com 9 plantas, totalizando 315 m² por unidade amostral. Para efeito de análise, foram desconsideradas as áreas de bordadura e uma porção irregular localizada na extremidade da área de estudo, a fim de evitar interferências marginais e garantir maior representatividade da população avaliada.

A definição do número de parcelas avaliadas neste estudo foi realizada por meio do cálculo de suficiência amostral para população finita, com o objetivo de

garantir representatividade estatística e precisão nas estimativas dos parâmetros de interesse. Considerou-se como população total o conjunto de 94 parcelas, correspondentes às unidades amostrais disponíveis na área de estudo.

O tamanho mínimo da amostra (n) foi estimado conforme os princípios da teoria de amostragem aplicada à mensuração florestal, amplamente descritos na literatura (PELLEGRINI NETTO; BRENA, 1997). Para populações finitas, utilizou-se a equação:

Equação 4 – Equação para cálculo de populações finitas

$$n = \frac{t^2 \cdot (CV)^2}{(E\%)^2 + \frac{t^2 \cdot (CV)^2}{N}}$$

Fonte: COCHRAN, W. G. (1977); SNEDECOR, G. W.; COCHRAN, W. G. (1989)

em que:

- n = número mínimo de parcelas necessárias (suficiência amostral);
- t = valor do quantil da distribuição t de Student, associado ao nível de confiança adotado;
- CV = coeficiente de variação da variável de interesse (%);
- $E\%$ = erro amostral admissível (%);
- N = tamanho da população (número total de parcelas).

O coeficiente de variação (CV) foi obtido a partir dos dados preliminares da variável analisada, enquanto o erro amostral admissível ($E\%$) e o nível de confiança foram definidos conforme recomendações da literatura para estudos de inventário e mensuração florestal, buscando um equilíbrio entre precisão estatística e viabilidade operacional (MACHADO; FIGUEIREDO FILHO, 2014).

A aplicação da equação indicou que a avaliação de 24 parcelas seria suficiente para representar adequadamente a população de 94 parcelas, atendendo ao critério de suficiência amostral. Dessa forma, a amostra selecionada garante confiabilidade às estimativas obtidas, conforme preconizado pela teoria de amostragem em estudos de biomassa e carbono em sistemas vegetais (PELLEGRINI NETTO; BRENA, 1997; MACHADO; FIGUEIREDO FILHO, 2014).

As parcelas sorteadas foram devidamente enumeradas e destacadas no croqui da área experimental (Figura 01), utilizando-se formatação em negrito e sublinhado para facilitar a identificação e possibilitar reavaliações subsequentes.

Nas parcelas selecionadas, foram mensurados todos os indivíduos arbóreos que apresentavam circunferência à altura do peito (CAP) superior a 15,0 cm e altura total mínima de 2,5 metros. As variáveis dendrométricas obtidas durante o inventário foram:

- circunferência à altura do peito (CAP);
- circunferência à altura da base (CAB);
- altura total das árvores (h).

Os critérios adotados seguiram padrões utilizados em inventários florestais e estudos dendrométricos para espécies arbóreas cultivadas, garantindo consistência técnica e comparabilidade com pesquisas similares.

4.2 Circunferências e Diâmetros

As medições de circunferência foram realizadas a 1,30 m do solo, correspondente à Circunferência à Altura do Peito (CAP), e também na altura da base do fuste, utilizando-se uma fita métrica graduada (Figura 02). Considerou-se para avaliação todos os fustes de cada indivíduo arbóreo que apresentassem CAP igual ou superior a 15 cm, os quais foram identificados, contabilizados e medidos individualmente.

Figura 2 – Figura 2A e 2B – Medição do CAP (Circunferência a altura do peito); figura 2C – Medição da CAB (Circunferência a altura da base – 30 cm acima do solo)



Fonte – O autor (2025)

As circunferências obtidas foram posteriormente convertidas em valores de diâmetro, assumindo que, nessa altura, a seção transversal do tronco aproxima-se geometricamente de uma circunferência. O Diâmetro à Altura do Peito (DAP) foi calculado pela equação matemática:

Equação 5 – Fórmula para conversão (CAP) da circunferência em diâmetro a altura do peito (DAP)

$$DAP = \frac{CAP}{\pi}$$

Fonte - SOARES; NETO; SOUZA (2011).

Onde:

- **DAP** = diâmetro à altura do peito (m);
- **CAP** = circunferência à altura do peito (m);
- **π** = constante 3,14159.

A adoção de 1,30m como altura padrão para a medição segue recomendações técnicas universalmente utilizadas em inventários florestais,

permitindo padronização e comparabilidade dos dados entre diferentes estudos e sistemas de mensuração.

4.2.1 Cálculo do Diâmetro equivalente

Para indivíduos com múltiplos fustes, utilizou-se o diâmetro equivalente (DAPeq), viabilizando a consolidação dos dados em uma única medida representativa por árvore. O DAPeq foi determinado conforme a expressão sugerida em estudos dendrométricos aplicados em ecossistemas tropicais (SOARES; NETO; SOUZA, 2011; SOUZA *et al.*, 2016), calculado pela soma das áreas transversais dos fustes:

Fórmula 6 – Fórmula para cálculo dos diâmetros equivalentes

$$D_{eq} = \sqrt{DAP_1^2 + DAP_2^2 + \dots + DAP_n^2}$$

Fonte - SOARES; NETO; SOUZA, 2011; SOUZA *et al.*, 2016

Onde “*n*” representa o número de fustes mensurados.

Esse método tem sido amplamente adotado na literatura para padronizar árvores com bifurcações ou ramificações múltiplas (SOUZA *et al.*, 2016; RAMOS *et al.*, 2021), garantindo comparabilidade e consistência nos cálculos volumétricos e de biomassa.

Este método também é conhecido como diâmetro equivalente ao coleto (DIEQ) ou, em inglês, equivalent diameter at root collar (EDRC), particularmente quando aplicado em estudos com árvores multifustes medidas à altura da base

4.3 Altura

A altura total das árvores (h) foi determinada por meio de uma mira topográfica graduada com 5,0 metros de comprimento, utilizada de forma adaptada às condições de campo. Embora a mira seja tradicionalmente empregada em levantamentos topográficos para medições de desnível e nivelamento, neste estudo foi empregada como instrumento de referência vertical, funcionando analogamente a uma régua de medição.

Para a coleta de dados, a mira foi posicionada verticalmente ao nível da base da árvore, no ponto de projeção do fuste, sendo sustentada por um auxiliar. A leitura da altura foi realizada pelo observador a partir da comparação visual entre a escala graduada da mira e o ponto mais alto da copa da árvore (Figura 3). Como nenhuma das árvores da área apresentou altura superior a 5 metros, não houve necessidade de adotar estimativa proporcional à extensão da mira.

Figura 3 – 3A - Medição da altura total (h) com a utilização da mira topográfica; 3B – Anotação das medidas de altura e CAP



Fonte – O autor (2025)

A altura (h) considerada para cada indivíduo correspondeu ao ponto mais elevado do dossel, observando-se o ápice terminal da copa. Esse procedimento foi adotado de forma padronizada para todas as medições realizadas, garantindo consistência metodológica

4.4 Tabulação dos dados

Os dados coletados no inventário foram tabulados em planilha eletrônica e analisados quanto à distribuição dos diâmetros equivalentes à altura do peito (DAPs), distribuição de altura (h), volume de madeira, biomassa, carbono e carbono equivalente (CO₂eq).

4.4.1 Quantificação do Volume de madeira

O volume de madeira de cada indivíduo arbóreo foi estimado utilizando a fórmula tradicional proposta por IMAÑA ENCINAS (1978), expressa por:

Fórmula 7 – Fórmula para calcular o volume de madeira

$$V = g \times h \times ff$$

Fonte - IMAÑA ENCINAS (1978)

Onde:

V = volume de madeira da árvore (m³);

g = área transversal ao nível do diâmetro à altura do peito - DAP (m²);

h = altura total (m), obtida conforme procedimentos descritos no inventário;

ff = fator de forma adimensional

A área transversal (g) ao nível do Diâmetro à Altura do Peito (DAP) foi estimada conforme a equação proposta por Soares, Neto e Souza (2011), utilizando-se a expressão:

Fórmula 8 – Fórmula para calcular a área transversal a altura do peito

$$g = \text{DAP}^2 \times (\pi/4)$$

Fonte - Soares, Neto e Souza (2011)

A fórmula baseia-se na aproximação geométrica de que, nessa altura, o tronco apresenta seção circular. Dessa forma, ao elevar-se o DAP ao quadrado e

multiplicá-lo por π , dividido por quatro, obtém-se a área basal individual, medida fundamental para estimativa de volume, biomassa e estoque de carbono (CAMPOS; LEITE, 2002).

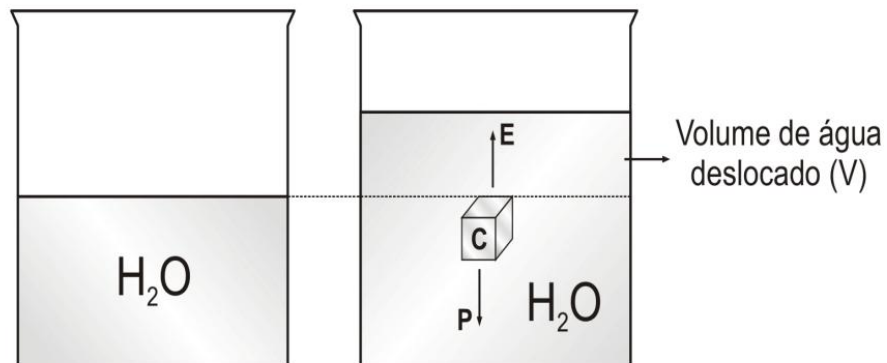
Nesta pesquisa, adotou-se o valor de 0,60 para o fator de forma (ff), considerado adequado para estimativas volumétricas de árvores de espécies tropicais, conforme Mahajan *et al.* (2021) que adotou $ff = 0,50$ para aplicações em sistemas semelhantes, optou-se pelo valor de 0,60, por melhor representação da forma média das árvores estudadas e por se alinhar com o comportamento de espécies frutíferas em fase produtiva.

A utilização de um fator de forma referenciado na literatura permite a aproximação do volume real do fuste a partir do volume teórico (cilíndrico), corrigindo a conicidade do tronco. A formulação empregada é amplamente validada para estudos que envolvem estimativas dendrométricas e análises de biomassa, permitindo resultados consistentes em termos de modelagem florestal quando associados a dados confiáveis de DAP e altura.

4.4.2 Determinação da densidade básica da madeira

A densidade da madeira foi determinada utilizando-se inicialmente do Princípio de Arquimedes, para calcular o volume de um corpo prova, segundo o qual “Todo corpo imerso em um fluido fica sujeito a uma força (empuxo), com direção vertical, de baixo para cima, de intensidade igual ao peso do volume de líquido deslocado ou igual ao volume do líquido deslocado x densidade do líquido x aceleração da gravidade local” ou seja, um corpo imerso em fluido desloca um volume de líquido equivalente ao seu próprio volume (Figura 4) (TIPLER; MOSCA, 2009).

Figura 4 – Demonstração do método de determinação de volume utilizando o Princípio de Arquimedes



Fonte - GILSON S. FERNANDES (2009)

A partir da figura anterior, pode-se descrever que:

$$E = P \quad (1)$$

$$P = mg \Rightarrow E = mg \quad (2)$$

$$\rho = m / v \quad (3)$$

Sendo a densidade da água igual a 1g.cm^{-3} (a 4°C), tem-se que:

$$m = v \quad (4)$$

Substituindo a expressão (4) na expressão (2), tem-se:

$$E = vg \quad (5)$$

A massa de água deslocada m pode ser obtida pela seguinte diferença:

$$m = m_s - m_r \quad (6)$$

Em que m_s e m_r correspondem às massas do recipiente com água com e sem o corpo-de-prova, respectivamente.

Substituindo a expressão (6) na expressão (2), tem-se:

$$E = (m_s - m_r) \text{ g (7)}$$

Finalmente, substituindo a expressão (7) na (5), tem-se:

$$(m_s - m_r) \text{ g} = v \text{ g} \Rightarrow v = m_s - m_r \text{ ou } v_c = m_s - m_r \text{ (8)}$$

Ao assumir que a densidade da água seja igual a 1 g/cm³ e considerando a relação entre massa e volume, pode-se inferir que o valor numérico da massa em gramas corresponde diretamente ao volume em centímetros cúbicos. Dessa forma, se o acréscimo de massa observado no recipiente com o corpo de prova for de 100 g, conclui-se que o volume deslocado pelo corpo equivale a 100 cm³, o que corresponde a 0,0001 m³.

4.4.2.1 Obtenção das amostras em campo

Para a obtenção dos toretes de madeira, foram selecionadas aleatoriamente três árvores distintas dentro da área amostral. A partir dessas árvores, foram coletadas amostras de fustes com circunferência superior a 15,0 cm, utilizando-se uma serra manual com arco fixo. A coleta ocorreu no dia 06 de novembro de 2025 no setor C4 da Fazenda Frutivita, local onde foi desenvolvido o trabalho. Optou-se pela remoção de segmentos provenientes de fustes juvenis, de modo a minimizar impactos fisiológicos sobre os indivíduos amostrados.

Cada fuste coletado foi seccionado em seis partes, as quais foram pesadas imediatamente em campo (Figura 5), identificadas e protegidas com filme plástico, a fim de evitar perda de umidade.

As amostras foram posteriormente encaminhadas ao Laboratório de Solos do IFSETE/PE, Campus Petrolina Zona Rural onde foram saturadas em água de acordo com o método especificado pela ABNT NBR 11941:2003 para garantir que o volume medido corresponderia ao volume “saturado” (ou verde) da amostra. Em seguida, as amostras foram secas em estufa a 105 ± 2 °C até atingir massa constante, conforme prescrito na norma, permitindo o cálculo da densidade básica com a fórmula $\rho_b = m_{seca}/V_{saturado}$. Também foram registrados no relatório todos os parâmetros

exigidos pela norma, como identificação da amostra, data da medição e as adaptações do procedimento.

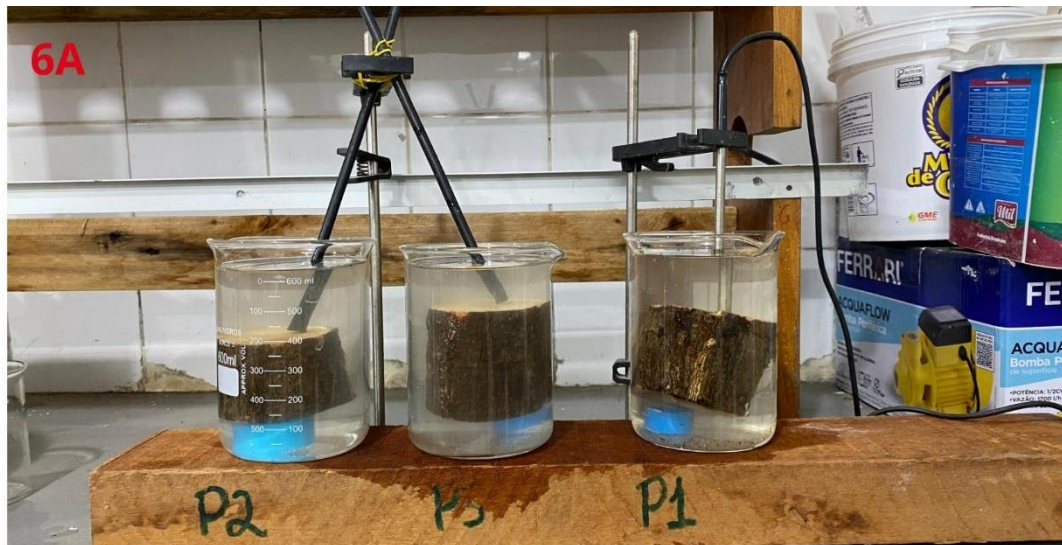
Figura 5 – Amostras de madeira da mangueira cultivar Kent retiradas em campo, pesadas em balança de cozinha comum (5A) e balança de suspensão digital (5B).



Fonte – O autor (2025)

Para possibilitar a completa submersão dos toretes durante o processo de saturação hídrica, foi necessária a adaptação de materiais no ambiente laboratorial. Utilizaram-se três béqueres de 600 mL, além de anéis confeccionados a partir de segmentos de tubo PVC, elásticos de fixação e microtubos utilizados em sistemas de irrigação, os quais atuaram como suporte e mecanismo de contenção do material vegetal. A montagem permitiu manter os toretes totalmente imersos na água destilada, evitando sua flutuação e garantindo adequada absorção hídrica ao longo do tempo (Figura 6A e 6B).

Figura 6A – Adaptação de materiais laboratoriais (béqueres de 600 mL, anéis de PVC, elásticos e microtubos de irrigação) utilizada para garantir a total imersão dos toretes de madeira durante o processo de saturação em água destilada.



Fonte – O autor (2025)

Do mesmo modo, as demais amostras também necessitaram de adaptações para permitir sua completa submersão durante o processo de saturação. Para isso, foram utilizados cilindros graduados (provetas), segmentos de tubos de PVC, além de outros materiais de suporte que auxiliaram na estabilização dos toretes no interior dos recipientes, evitando sua flutuação e garantindo o contato integral com a água. Esses dispositivos permitiram realizar o monitoramento visual da ascensão da coluna líquida e assegurar a saturação uniforme das amostras (Figura 6B).

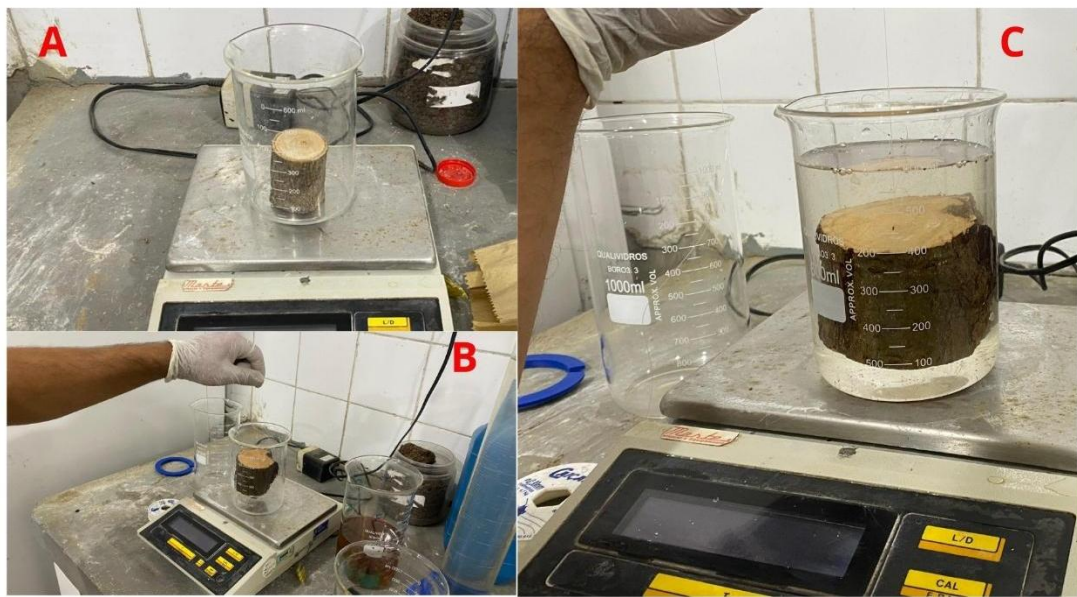
Figura 6B – Adaptação de materiais laboratoriais com uso de provetas, segmentos de PVC e estruturas de suporte para garantir a submersão completa dos toretes durante o processo de saturação hídrica.



Fonte – O autor (2025)

Após o período de saturação, cada amostra de madeira (corpo de prova) foi submetida ao procedimento de pesagem conforme preconizado pela ABNT NBR 11941:2003. Inicialmente, os corpos de prova foram pesados em ar, utilizando balança analítica devidamente calibrada. Em seguida, cada amostra foi novamente pesada submersa em água destilada, mantendo-se totalmente imersa para determinar o seu volume via deslocamento de líquido (Figura 7). Esse procedimento permite obter a massa aparente em meio aquoso, essencial para o cálculo do volume saturado, seguindo os critérios definidos pela norma (ABNT, 2003).

Figura 7 – Amostras totalmente imersas para determinar o seu volume via deslocamento de líquido.



Fonte – O autor (2025)

Após o procedimento de pesagem das amostras saturadas, os corpos de prova foram submetidos à secagem em estufa a 105 ± 2 °C (Figura 8) conforme recomenda a ABNT NBR 11941:2003.

Figura 8 – 8A – Termostato da estufa marcando 105 °C - 8B - Amostras colocadas em estufa a temperatura constante de 105 ± °C



Fonte - O autor (2025)

A verificação da massa seca foi realizada em intervalos de 24, 48, 72 e 96 horas, utilizando balança analítica. Observou-se que, a partir de 96 horas, não houve variação significativa entre pesagens consecutivas (inferior a 0,5 g), indicando estabilização da massa. Dessa forma, considerou-se esse valor como massa seca constante, sendo posteriormente utilizado para o cálculo da densidade básica da madeira.

Além do método gravimétrico conforme ABNT NBR 11941:2003, também foi utilizada a técnica do Máximo Teor de Umidade, proposta por Foelkel *et al.* (1971), a qual consiste na determinação da densidade básica a partir da pesagem da amostra completamente saturada e posteriormente seca em estufa até massa constante.

Fórmula 9 – Cálculo para determinação de densidade básica da madeira pela técnica do máximo teor de umidade.

$$\rho_b = \frac{m_s}{m_s + \frac{m_u - m_s}{G_s}}$$

Fonte: Foelkel *et al.* (1971)

Onde: (ms) é a massa seca (g), (mu) a massa saturada (g) e (Gs) a densidade da substância madeira, assumida como 1,53 g/cm³ (SMITH, 1954; STAMM, 1964).

Este método se destaca por sua precisão, rapidez e simplicidade, sendo amplamente empregado tanto em pesquisas científicas quanto em análises de rotina industrial. Os autores relatam que não há diferença estatisticamente significativa entre este método e o da balança hidrostática, destacando sua viabilidade operacional. Contudo, é essencial garantir a completa saturação da madeira, aspecto rigorosamente observado neste estudo. Considerando que as amostras analisadas tratavam-se de madeira juvenil de *M. indica*, foram adotadas adaptações experimentais para assegurar a eficiência do procedimento (SMITH, 1955; STAMM, 1964; FOELKEL *et al.*, 1971;).

A densidade básica da madeira determinada pelo método hidrostático, conforme a ABNT NBR 11941:2003, apresentou valor médio de 0,41 g/cm³ (410 kg/m³), enquanto o método do Máximo Teor de Umidade, proposto por Foelkel *et al.* (1971), resultou em 0,44 g/cm³ (440 kg/m³). A diferença observada entre os métodos foi de aproximadamente 7,32% com o método de Foelkel apresentando valores ligeiramente superiores. Conforme descrito pelo autor, esse método tende a estimar valores mais elevados, sobretudo em amostras com indícios de elevada impregnação hídrica e maior proporção de tecidos juvenis, como observado neste estudo.

Apesar da variação, ambos os métodos apresentaram consistência técnica e valores dentro da faixa aceitável para estimativas dendrométricas e de biomassa, sendo considerados equivalentes do ponto de vista estatístico, em concordância com Foelkel *et al.* (1971) e a ABNT (2003). Para os cálculos de biomassa, optou-se por utilizar o valor mais elevado, proveniente do método do máximo teor (0,44 g/cm³), por ser normatizado e amplamente utilizado em estudos científicos e inventários florestais.

4.4.3 Quantificação da Biomassa

A biomassa lenhosa acima do solo foi estimada por meio da relação volumétrica-densimétrica, expressa pela equação:

Fórmula 10 – Cálculo para determinação da biomassa

$$Biomassa (kg) = V \times Db \times 1000$$

Onde:

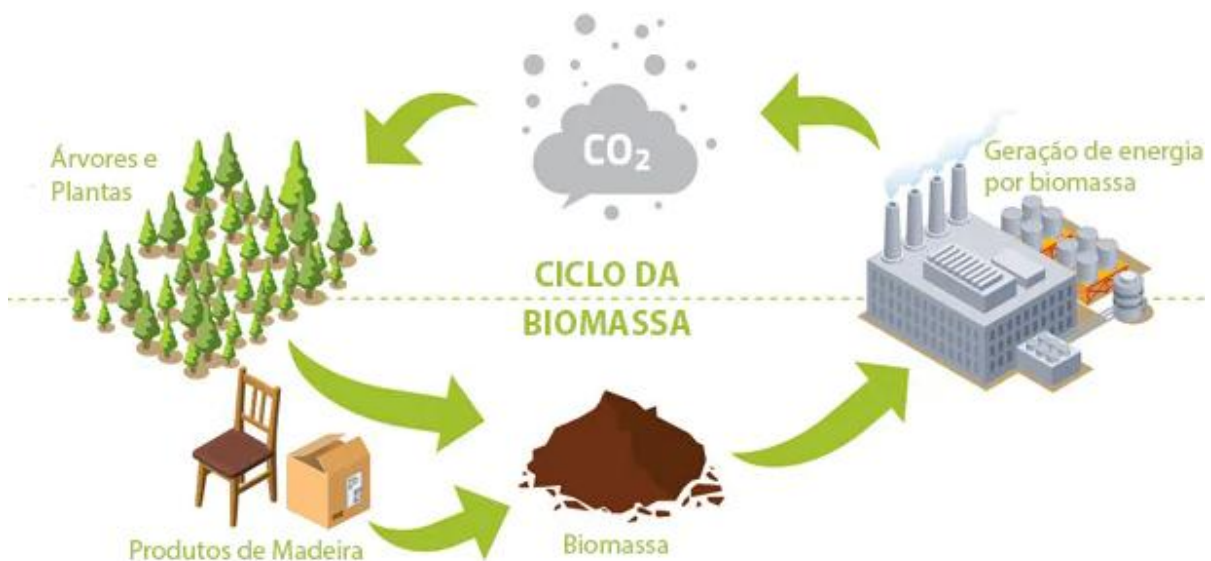
- Biomassa = biomassa aérea da árvore (kg);
- V = volume do fuste (m^3), determinado conforme os procedimentos descritos anteriormente;
- Db = densidade básica da madeira (kg/m^3), adotando-se o valor de $0,42\text{ g/cm}^3$, equivalente a 420 kg/m^3 , obtido experimentalmente para a variedade de *M. indica* cv. *Kent*.

A multiplicação por 1000 foi aplicada para conversão da unidade de densidade de g/cm^3 para kg/m^3 quando expressa diretamente na equação volumétrica. O valor de densidade foi determinado em laboratório segundo metodologia de secagem em estufa ($105 \pm 2\text{ }^\circ\text{C}$) até massa constante, relacionando-se a massa seca ao volume da amostra em condição verde, conforme recomendações técnicas para determinação de densidade básica da madeira (ABNT NBR 11941:2003).

A adoção de valor localmente determinado para densidade proporciona maior precisão na estimativa de biomassa, uma vez que minimiza erros associados ao uso de valores médios de literatura, frequentemente variáveis entre espécies, cultivares e condições ambientais. Assim, a estimativa de biomassa obtida neste estudo reflete com maior representatividade as características específicas da madeira da variedade analisada.

Para facilitar a compreensão do papel da biomassa no ciclo do carbono, a Figura 9 ilustra de maneira simplificada as etapas que envolvem a absorção de CO_2 pelas plantas, a formação da biomassa e seu aproveitamento em diferentes usos.

Figura 9 - Representação esquemática do ciclo da biomassa e sua relação com o carbono atmosférico.



Fonte: isen.com.br

Conforme ilustrado na Figura 9, o ciclo da biomassa envolve a fixação do carbono atmosférico pelas plantas, sua conversão em biomassa vegetal e o posterior aproveitamento desse material em diferentes usos, como produtos madeireiros e geração de energia. A eficiência desse ciclo depende diretamente da capacidade das espécies vegetais em acumular biomassa ao longo do tempo, especialmente em sistemas perenes, nos quais o carbono pode permanecer estocado por longos períodos na madeira.

4.4.4 Quantificação do Carbono

O estoque de carbono foi calculado utilizando a fração de carbono padrão para árvores tropicais: $C = \text{Biomassa} * 0,50$

A utilização do valor 0,50 como fração de carbono é considerada um padrão internacional em inventários florestais e estudos de sequestro de carbono, principalmente por ser o valor recomendado pelo IPCC (2006; 2019) quando não se dispõe de análises laboratoriais específicas para a espécie estudada. Diversos estudos demonstram que o teor de carbono na madeira varia relativamente pouco entre árvores tropicais, mantendo-se geralmente próximo de 50%. Uma análise

abrangente conduzida no Panamá com 59 espécies arbóreas tropicais identificou valores variando de 41,9% a 51,6%, com média de 47,4% (Martin; Thomas, 2011).

Estudos internacionais complementares, realizados em florestas úmidas e sazonais da Ásia, África e América Latina, reportam conteúdos variando entre 47% e 54%, dependendo da densidade da madeira e da proporção entre tecidos estruturais e parênquima (Bert; Danjon, 2006; Thomas & Malczewski, 2007). No Brasil, pesquisas com espécies nativas amazônicas e da Mata Atlântica também encontraram teores médios entre 46% e 52%, reforçando a consistência desse intervalo para espécies tropicais (Sarmiento *et al.*, 2015; Nogueira *et al.*, 2018).

O uso de 50% representa uma aproximação adequada e amplamente aceita pelo IPCC e pela comunidade científica, embora possa superestimar ligeiramente o carbono em 2-5% comparado ao valor médio de 47,4%.

Diante desses valores, o fator 0,50 é considerado uma estimativa robusta e conservadora, apresentando baixa probabilidade de subestimar o estoque real. Embora o valor médio de 47,4% citado em estudos pan-tropicais seja ligeiramente inferior, resultando em uma possível superestimativa de aproximadamente 2-5%, essa diferença é considerada metodologicamente aceitável, sobretudo em pesquisas aplicadas, inventários e análises comparativas. Além disso, o IPCC determina que, na ausência de dados específicos por espécie, deve-se empregar o valor genérico de 0,50 tanto para madeira quanto para biomassa aérea total.

4.4.5 Quantificação do dióxido de carbono equivalente (CO₂eq)

A conversão do estoque de carbono presente na biomassa da *M. indica* em dióxido de carbono equivalente (CO₂eq) foi realizada seguindo a recomendação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2006). Para essa conversão, utilizou-se o fator estequiométrico resultante da razão entre a massa molecular do dióxido de carbono (44 g mol⁻¹) e a massa atômica do carbono (12 g mol⁻¹), o que corresponde ao valor de $44/12 \approx 3,67$. Dessa forma, o CO₂eq foi obtido mediante aplicação da expressão:

Fórmula 11A – 11B – Cálculo para determinação de carbono sequestrado CO_{2eq} convertida pela razão estequiométrica 44/12

$$CO_{2eq} = C \times \frac{44}{12} = C \times 3,67$$

11A

A adoção desse fator considera que uma molécula de CO₂ possui massa atômica total de 44 unidades (12 provenientes do carbono e 32 do oxigênio), enquanto um átomo de carbono apresenta massa de 12 unidades, justificando a relação molecular utilizada no cálculo. Esse procedimento permitiu estimar o dióxido de carbono equivalente a partir do carbono identificado na biomassa vegetal.

Exemplo: Se uma árvore ou biomassa contém, por exemplo, 1 tonelada de Carbono, isso corresponde a expressão:

$$1 \text{ t C} \times 3,67 = 3,67 \text{ t CO}_{2eq}$$

11B

Ou seja, fixar 1 tonelada de Carbono na forma de biomassa representa retirar da atmosfera o equivalente a 3,67 toneladas de CO₂.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Distribuição dos Diâmetros Equivalentes à Altura do Peito (DAP)

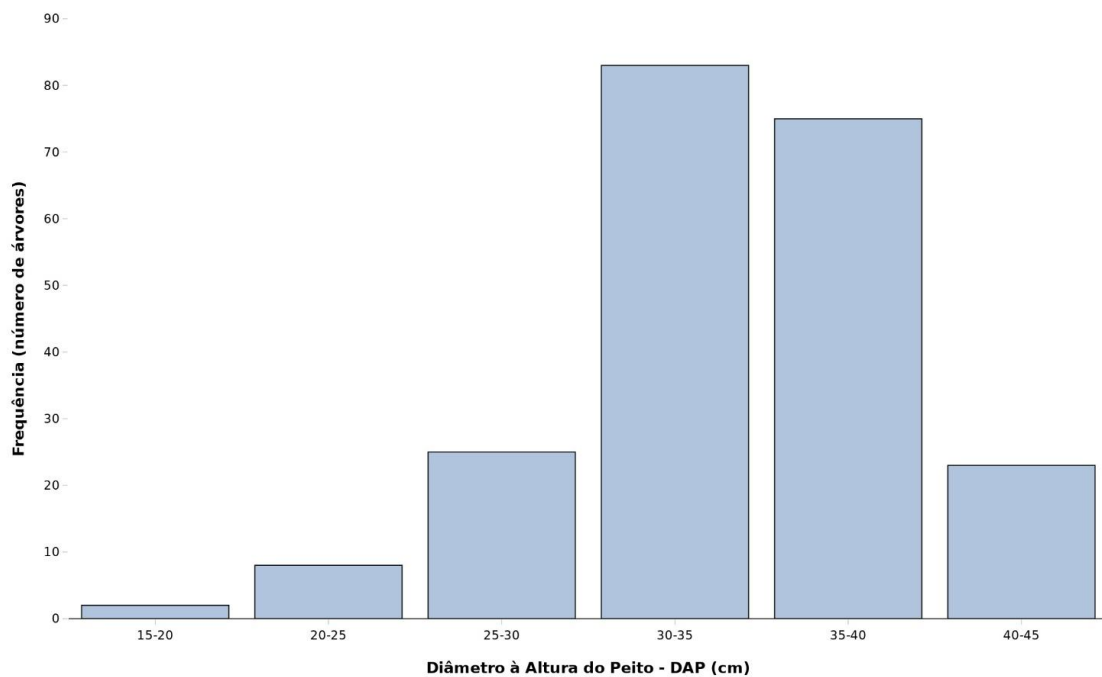
A análise dendrométrica de 216 indivíduos de *M. indica* L (Figura 10) revelou uma distribuição diamétrica típica de um povoamento em estágio intermediário de desenvolvimento. O diâmetro à altura do peito (DAP) médio foi de 34,25 cm, variando entre 15,60 cm e 43,96 cm, com coeficiente de variação de 14,27%. Este coeficiente indica moderada homogeneidade estrutural entre as árvores avaliadas. Esse padrão de variação é igualmente observado em pomares adultos de mangueira e em outras frutíferas perenes tropicais, confirmando que a variabilidade moderada

do DAP caracteriza talhões conduzidos sob manejo produtivo uniforme (SOARES; PAULA NETO; SOUZA, 2011; CHAVAN; DHOTE; KHAIRNAR, 2012; FARIAS; RAMOS; DIAS, 2017).

A distribuição diamétrica apresentou forte concentração nas classes intermediárias, com as classes de 30-35 cm e 35-40 cm representando 38,43% (83 árvores) e 34,72% (75 árvores) do total, respectivamente. Em conjunto, essas classes concentram 73,15% dos indivíduos inventariados, caracterizando um povoamento relativamente uniforme, condição típica de plantios comerciais estabilizados quanto ao crescimento secundário. A baixa representatividade das classes extremas reforça essa interpretação: apenas 0,93% das árvores (2 indivíduos) apresentaram DAP inferior a 20 cm, enquanto 10,65% (23 indivíduos) apresentaram DAP superior a 40 cm.

Esse padrão encontra suporte na literatura. Segundo autores que estudam a estrutura diamétrica em espécies cultivadas e nativas, distribuições fortemente concentradas em classes médias indicam estabilidade do povoamento, sugerindo crescimento contínuo e ausência de descontinuidades estruturais relevantes (SCOLFORO; THIERSCH; MELLO, 1998; COSTA; SCHNEIDER; FINGER, 2016; HUSSAIN; RAFIQ; IQBAL, 2016).

Figura 10 – Distribuição do diâmetro da altura do peito (DAP) das árvores de *M. indica* analisadas



Fonte - O autor (2025)

Em concordância com essas observações, os resultados sugerem que o talhão avaliado apresenta composição estrutural relativamente homogênea, com predomínio de árvores em fase produtiva adulta, sem indícios de renovação recente ou de ocorrência de perturbações significativas que alterassem a dinâmica diamétrica do pomar.

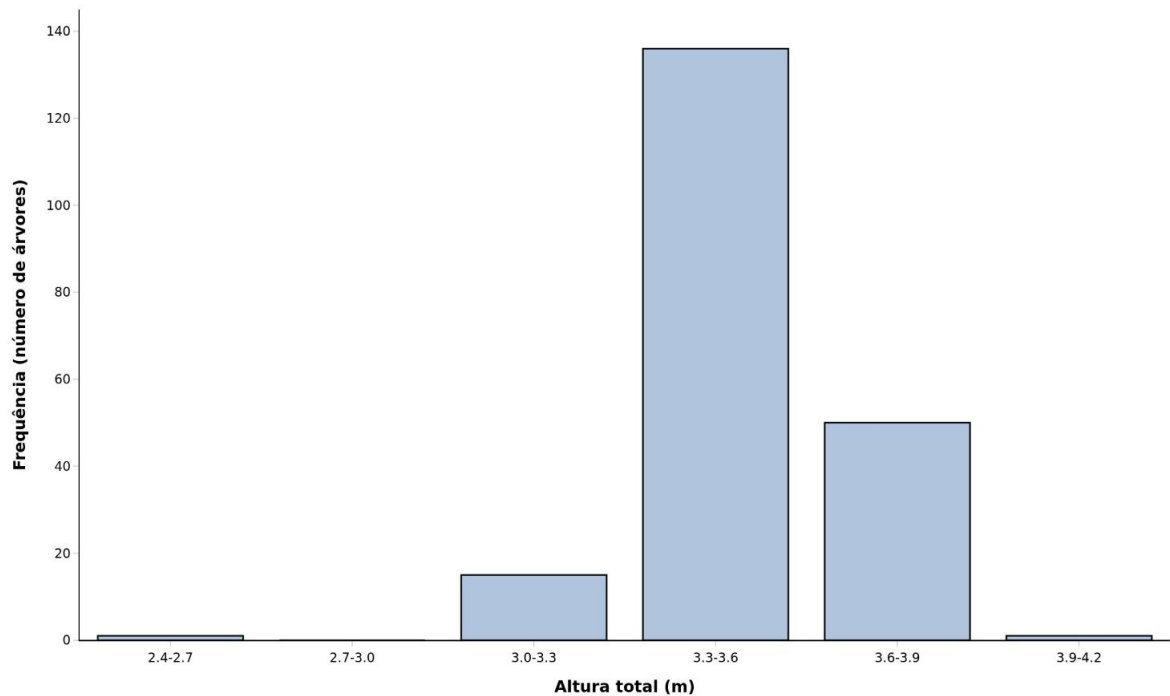
5.2 Distribuição de Altura

As alturas das árvores apresentaram baixa variabilidade estrutural (Figura 11), com média de 3,46 m, coeficiente de variação de 5,00% e amplitude variando entre 2,50 m e 4,30 m. A mediana de 3,50 m, praticamente coincidente com a média, indica uma distribuição aproximadamente simétrica, característica de pomares conduzidos sob manejo uniforme. Segundo estudos dendrométricos em frutíferas perenes, baixos coeficientes de variação para altura são comuns em talhões homogêneos, especialmente em espécies como *M. indica*, que apresentam crescimento vertical mais estável sob condições de irrigação e adubação controladas

(SOARESPAULA NETO; SOUZA, 2011; KUMAR; KUMAR; REDDY, 2016; LIMA; SANTOS; SILVA, 2018).

Esse padrão de simetria distributiva é igualmente relatado em pomares adultos de mangueira e outras espécies tropicais, evidenciando estabilidade estrutural e baixa competição por luz. Esses fatores contribuem diretamente para a uniformidade do desenvolvimento do dossel (COSTA; SCHNEIDER; FINGER, 2016; BEZERRA; LOPES; ANDRADE, 2019).

Figura 11 – Distribuição da altura das árvores de *M. indica* analisadas.



Fonte - O autor (2025)

Esses resultados reforçam que o povoamento analisado apresenta bom nivelamento de crescimento, com ausência de indivíduos que destoam significativamente da estrutura vertical do talhão.

5.3 Resultados Volume

O volume total estimado para as 216 árvores de *M. indica* foi de 42,196 m³, com volume médio individual de 0,19535 m³ (equivalente a 195,35 litros por árvore). Os valores individuais variaram entre 0,0287 m³ (volume mínimo) e 0,3186 m³ (volume máximo), resultando em um coeficiente de variação de 26,98%, indicando dispersão moderada entre os indivíduos analisados.

A variabilidade observada no volume é considerada moderada e está diretamente relacionada às diferenças individuais no diâmetro à altura do peito (DAP). Como o volume é matematicamente e biologicamente relacionado ao quadrado do DAP, pequenas variações nesse parâmetro resultam em diferenças expressivas no volume estimado, conforme amplamente discutido na literatura dendrométrica (SCOLFORO; THIERSCH; MELLO, 1998; SOARES; PAULA NETO; SOUZA, 2011).

Estudos com pomares de mangueira e outras frutíferas tropicais relatam coeficientes de variação semelhantes, especialmente em talhões adultos onde diferenças estruturais no crescimento secundário influenciam significativamente o volume individual (CHAVAN; DHOTE; KHAIRNAR, 2012; HUSSAIN; RAFIQ; IQBAL, 2016).

A combinação de volume médio estável e variabilidade moderada sugere que o pomar apresenta estrutura produtiva consistente, porém com diferenças naturais entre indivíduos, comportamento esperado em espécies perenes, especialmente quando cultivadas sob condições de campo abertas, com heterogeneidade de microambientes, manejo e vigor fisiológico.

5.4 Densidade Básica da Madeira de *M. indica*

A densidade básica de 0,42 g/cm³ obtida para a variedade *M. indica* cv. Kent no presente estudo apresenta-se inferior aos valores usualmente descritos na literatura científica para a espécie. Estudos de compilação realizados pela FAO

indicam densidades médias em torno de 0,59 g/cm³, podendo alcançar valores superiores em determinadas condições (FAO, 2012).

Também é relatado por autores como Kushwaha *et al.* (2022) que a densidade da madeira de mangueira pode variar entre 0,48 e 0,66 g/cm³, dependendo do sítio de crescimento e do método de determinação. Fontes técnico-comerciais, como o *The Wood Database*, apontam valores entre 590 e 800 kg·m⁻³ (aproximadamente 0,59–0,80 g/cm³) para a madeira de *M. indica* em condição de equilíbrio a 12% de umidade (THE WOOD DATABASE, 2024). Sandra Brown (2019) também ressalta variabilidade significativa entre espécies e condições ecológicas, destacando a necessidade de medições locais para estudos dendrométricos e de biomassa.

Dessa forma, o valor experimental de 0,44 g/cm³, ainda que inferior aos valores usuais, é representativo da população amostrada e reforça a importância da caracterização físico-tecnológica específica por cultivar e ambiente.

A densidade básica da madeira de *M. indica* apresenta variações moderadas, com valores médios geralmente situados entre 520 e 590 kg/m³ (0,52 a 0,59 g/cm³). Essa amplitude é consistente entre estudos internacionais e regionais e reflete a influência de fatores como posição no tronco, idade da árvore, condições edafoclimáticas e características anatômicas do lenho.

Pesquisas conduzidas em Uganda registraram densidade básica variando de 534,0 kg/m³ a 585,2 kg/m³, com valores mais elevados na porção superior do tronco e menores na base, comportamento típico da anisotropia e da variação radial e axial da madeira (KALENDA; KIGGUNDU; TUMWEBAZE, 2017). Dados internacionais complementam esse intervalo, indicando densidade média ao ar seco de aproximadamente 675 kg/m³ e gravidade específica variando entre 0,52 e 0,68, valores considerados típicos para espécies frutíferas tropicais (FAO, 1997; LOUREIRO; SILVA; LIMA, 2000).

No contexto brasileiro, estudos de caracterização de madeiras urbanas classificam *M. indica* como pertencente ao grupo das espécies de densidade moderada, com gravidade específica entre 0,50 e 0,70 g/cm³, alinhando-se

amplamente aos registros internacionais (OLIVEIRA; BRAZOLIN; TOMAZELLO-FILHO, 2012).

De forma geral, a densidade média de referência para *M. indica* situa-se em torno de 550 kg/m³ (0,55 g/cm³), valor adequado para estimativas de biomassa e carbono, enquanto as variações entre 520 e 590 kg/m³ refletem diferenças intrínsecas da espécie e condições de crescimento.

Para este trabalho a densidade básica da madeira foi obtida a partir do método hidrostático, conforme os procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR 11941:2003 (ABNT, 2003), no qual apresentou valor médio de 0,41 g/cm³ (410 kg/m³). Quando aplicada a metodologia do Máximo Teor de Umidade, proposta por Foelkel *et al.* (1971), o valor médio estimado foi de 0,44 g/cm³ (440 kg/m³), representando um acréscimo aproximado de 7,32% em relação ao método hidrostático. Os resultados corroboram as observações de Foelkel *et al.* (1971), que relatam que este método tende a gerar valores ligeiramente superiores devido à maior eficiência na saturação de água em estruturas lenhosas jovens ou com elevada proporção de tecidos parenquimáticos.

De acordo com os autores, não há diferença estatisticamente significativa entre os dois métodos quando a saturação é conduzida de forma adequada, sendo considerados equivalentes para fins de estimativa de densidade básica. No entanto, para os cálculos de biomassa, optou-se por utilizar o valor proposto por Foelkel *et al.* (1971) (0,44 g/cm³), por ser normatizado e amplamente utilizado em estudos científicos e inventários florestais.

5.5 Resultados biomassa

A biomassa total estimada para as 216 árvores de *M. indica* foi de 18.566,19 kg (equivalente a 18,56 toneladas), com biomassa média individual de 85,95 kg. Os valores variaram entre 12,61 kg (mínimo) e 140,19 kg (máximo), resultando em coeficiente de variação de 26,98%, assim como o observado para o volume, o que confirma a relação direta entre biomassa e DAP quando se utiliza

densidade da madeira constante. Essa correlação entre diâmetro e biomassa é amplamente documentada em estudos dendrométricos e de quantificação de carbono em espécies tropicais (SCOLFORO; THIERSCH; MELLO, 1998; SOARES; PAULA NETO; SOUZA, 2011).

A correspondência entre os coeficientes de variação do volume e da biomassa confirma que o uso de densidade constante manteve proporcionalidade direta entre essas variáveis, reforçando a consistência dos métodos aplicados.

5.6 Resultados Carbono

A proporção de carbono na biomassa seca de espécies lenhosas tropicais varia tipicamente entre 41,9% e 51,6%, com média de 47,4%, segundo compilações de valores regionais e globais de carbono em madeira (IPCC, 2006; THAKUR; MISHRA; SINGH, 2019). Outros estudos reforçam que árvores tropicais frequentemente apresentam teores entre 47% e 54% (BROWN; LUGO, 1984; CHAVE; ANDALO; BROWN, 2005). Assim, a adoção do valor padrão de 50%, recomendado pelo IPCC para estimativas generalistas, constitui prática amplamente aceita, embora possa superestimar o carbono em cerca de 2 a 5% quando comparado ao valor médio de 47,4%.

Dessa forma, o carbono total armazenado nas 216 plantas foi de 9.283,09 kg, equivalente a 9,28 toneladas de C, resultando em média de 42,98 kg de carbono por árvore. Esse valor encontra-se dentro dos intervalos reportados para *M. indica*, cuja capacidade de sequestro varia entre 42,46 kg e 179,90 kg por indivíduo, dependendo da idade, do manejo e do vigor das plantas (CHAVAN; DHOTE; KHAIRNAR, 2012; HUSSAIN; RAFIQ; IQBAL, 2016).

Em pomares adultos da Índia, Salunkhe *et al.* (2021) observaram valores semelhantes, reforçando que plantios comerciais bem manejados possuem alta capacidade de acumular biomassa e carbono.

Assim, os valores observados neste estudo posicionam o pomar analisado dentro da faixa esperada para *M. indica*, evidenciando que cultivos frutíferos tropicais podem desempenhar um papel relevante na remoção de carbono atmosférico e na mitigação das mudanças climáticas quando manejados de forma sustentável.

5.7 Resultados CO₂ equivalente

A conversão de Carbono para dióxido de carbono equivalente (CO₂eq) foi realizada por meio de relação estequiométrica. Essa conversão decorre da razão molecular entre o CO₂ (massa molar de 44 g mol⁻¹) e o carbono elementar (12 g mol⁻¹), resultando no fator $44/12 = 3,67$, conforme as diretrizes metodológicas para inventários florestais e relatórios de emissões de gases de efeito estufa do Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2006). Essa métrica permite expressar o potencial de mitigação das mudanças climáticas associado ao sequestro de carbono em biomassa, padronizando comparações entre diferentes ecossistemas, cultivos e sistemas produtivos.

Com isso, a estimativa total de CO₂eq obtida nas 216 árvores foi de 34.068,96 kg, equivalente a 34,06 toneladas de CO₂eq, com média de 157,72 kg por planta, variando entre 23,13 kg e 257,24 kg. Esses valores estão compatíveis com estudos realizados em pomares produtivos e sistemas agroflorestais, nos quais a magnitude da biomassa e do sequestro de carbono está diretamente associada ao crescimento secundário, ao manejo aplicado e à disponibilidade de recursos ambientais (BEZERRA; LOPES; ANDRADE, 2019; KUMAR; KUMAR; REDDY, 2016).

A média de CO₂eq por árvore demonstra que indivíduos adultos de *M. indica* possuem capacidade expressiva de remoção de dióxido de carbono da atmosfera, corroborando estudos internacionais que destacam o potencial de espécies frutíferas tropicais no sequestro de carbono (MUTHURI *et al.*, 2023).

Assim, o balanço de CO₂eq observado neste estudo reforça o papel dos pomares de mangueira como importantes sumidouros de carbono em ambientes

agrícolas tropicais irrigados, contribuindo positivamente para a mitigação das mudanças climáticas e para o fortalecimento de práticas agrícolas sustentáveis.

5.8 Relações Alométricas e Validação dos Cálculos

Com base nos dados obtidos no inventário das 216 árvores de *M. indica* avaliadas em uma área de 0,75 hectare, foram estimados os valores de volume de madeira, biomassa seca, estoque de carbono e dióxido de carbono equivalente (CO₂eq) tabela 1. Esses parâmetros permitem compreender a estrutura do pomar, sua capacidade de acúmulo de biomassa e seu potencial de mitigação climática por meio do sequestro de carbono.

Tabela 1 – Estoques de Volume, Biomassa, Carbono e CO₂eq das 216 árvores inventariadas e dimensionamento para a área total de 3,5 hectares.

Variável	216 plantas (0,75 ha)	Média por planta	Variação individual	Desvio-padrão (%)	Estimativa (3,5 ha)	Estimativa (1 ha)
Volume (m³)	42,196	0,195	0,0287 – 0,318	0,052	195,547	55,870
Biomassa (kg/t)	18566,19 (18,56 t)	85,95 kg	12,61 – 140,19 kg	23,19	86040,53 (86,04 t)	24583,0 (24,58 t)
Carbono (kg/t)	9283,09 (9,28 t)	42,98 kg	42,46 – 179,90 kg	11,59	43020,24 (43,02 t)	12291,49 (12,29 t)
CO₂ eq. (kg/t)	34068,96 (34,06 t)	157,72 kg	23,13 – 257,24 kg	42,55	157884,39 (157,88 t)	45109,82 (45,10 t)

Fonte – O autor (2025)

A tabela 1 sintetiza os resultados obtidos para volume de madeira, biomassa, carbono e dióxido de carbono equivalente (CO₂eq), apresentando não apenas os totais observados nas 216 plantas avaliadas (0,75 ha), mas também seus valores médios, faixas de variação individual, desvios-padrão e a extrapolação dos estoques para a área total do pomar (3,5 ha; 1001 plantas) e para a área de 1 hectare (286 plantas).

O comportamento das variáveis demonstra forte coerência interna entre volume, biomassa e carbono, refletindo o crescimento secundário típico de espécies perenes como *M. indica*. A variabilidade moderada observada ($CV = 26,98\%$) é esperada em pomares adultos, nos quais fatores como arquitetura de copa, histórico de podas, microambiente e vigor individual influenciam diretamente o acúmulo de biomassa e carbono.

Ao escalar os valores para a área total, observa-se que o pomar possui:

- 195,54 m³ de madeira,
- 86,04 t de biomassa seca,
- 43,02 t de carbono,
- 157,88 t de CO₂ equivalente armazenados no tecido lenhoso.

Esses resultados posicionam o pomar dentro da faixa esperada para cultivos tropicais bem manejados e reforçam o potencial de sistemas frutíferos irrigados como importantes sumidouros de carbono, contribuindo diretamente para ações de mitigação das mudanças climáticas.

A proporção entre Carbono/Biomassa = 0,50 (50%) amplamente utilizada em inventários de carbono e segue as diretrizes recomendadas pelo (IPCC, 2006; IPCC, 2019), que consideram o carbono como aproximadamente metade da massa seca da biomassa vegetal. Essa proporção também é compatível com valores médios de carbono em madeiras tropicais, variando entre 47% e 54%, conforme compilado por Thomas e Martin (2012).

As relações observadas também são consistentes com modelos alométricos desenvolvidos especificamente para *M. indica*. Um estudo de referência publicado no *Journal of Environment and Earth Science* propôs equações distintas para diferentes classes de DAP, apresentando coeficientes de determinação (R^2) entre 93,8% e 98,6%, evidenciando alto poder preditivo (Nduwamungu; Mugasha; Bollandsås; Eid, 2012). Paralelamente, estudos recentes conduzidos pelo CIFOR-ICRAF na África Oriental validaram equações alométricas para biomassa de mangueiras em sistemas agroflorestais, com erros inferiores a 30% e forte

dependência de DAP e altura (Kuyah; Muthuri; Wakaba; Cyamweshi; Kiprotich; Mukuralinda, 2023).

Esses resultados confirmam que os valores matemáticos utilizados neste trabalho, densidade de 440 kg/m³, fração de carbono igual a 50% e fator de conversão de CO₂/C de 3,67, estão plenamente alinhados com a literatura técnico-científica e refletem condições reais da espécie em ambientes tropicais.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo permitiu estimar a biomassa lenhosa em pé e o carbono sequestrado em um pomar comercial de *M. indica* no Submédio do Vale do São Francisco, evidenciando o elevado potencial da cultura como sumidouro de carbono em condições semiáridas. As 216 árvores avaliadas acumularam 42,196 m³ de madeira, correspondentes a 18,56 t de biomassa, 9,28 t de carbono e 34,06 t de CO₂ equivalente, confirmando a relevância ambiental da mangueira na mitigação das emissões de gases de efeito estufa. Os resultados demonstram que a fruticultura irrigada alia elevada geração de valor econômico a benefícios ambientais, reforçando a importância de políticas públicas voltadas ao manejo sustentável e à expansão dessa cultura. Recomenda-se a continuidade de estudos de longo prazo e a aplicação de métodos não destrutivos e equações alométricas específicas, visando aprimorar as estimativas de sequestro de carbono em sistemas frutíferos irrigados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11941: determinação da densidade básica da madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS PRODUTORES E EXPORTADORES DE FRUTAS E DERIVADOS (ABRAFRUTAS). Abrafrutas celebra grande conquista: mercado chinês abre as portas para uvas frescas brasileiras. 2024. Disponível em: <https://abrafrutas.org/2024/11/abrafrutas-celebra-grande-conquista-mercado-chines-abre-as-portas-para-uvas-frescas-brasileiras>. Acesso em: 29 jan. 2025.

AVERY, T. E.; BURKHART, H. E. *Forest measurements*. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 1997. 408 p. (McGraw-Hill series in forest resources).

AVERY, T. E.; BURKHART, H. E. *Forest measurements*. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 2002.

BARROS, M. et al. Carbono do solo em cultivos de manga (*Mangifera indica* L.) no Submédio do Vale do São Francisco. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE FRUTICULTURA, 26., 2019, Juazeiro; Petrolina. Anais [...]. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1115286>. Acesso em: 28 nov. 2024.

BERT, D.; DANJON, F. Carbon concentration variations in the roots, stem and crown of mature maritime pines. *Tree Physiology*, v. 26, p. 1229–1238, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1093/treephys/26.9.1229>. Acesso em: 22 nov. 2025.

BRASIL. Serviço Florestal Brasileiro. *Inventário Florestal Nacional – Metodologia*. Brasília: SFB, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/florestal>. Acesso em: 19 nov. 2025.

BRIANEZI, D. et al. Equações alométricas para estimativa de carbono em árvores de uma área urbana em Viçosa, MG. *Revista Árvore*, v. 37, n. 6, p. 1073–1081, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622013000600009>.

BROWN, S. *Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer*. Rome: FAO, 1997. (FAO Forestry Paper, 134).

BROWN, S. *Wood densities of tropical tree species*. 2019. Relatório técnico. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/wood_density_database. Acesso em: 20 nov. 2025.

BURKHART, H. E.; AVERY, T. E. *Forest measurements*. 6. ed. New York: McGraw-Hill, 2013.

CAMPOS, J. C. C. *Dendrometria*. Viçosa: UFV, 1988. 43 p.

CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. *Mensuração florestal: perguntas e respostas*. Viçosa: UFV, 2002. 407 p.

CARNEIRO, J. M. Avaliação das pegadas de carbono e hídrica da produção de manga em sistemas convencionais do Polo Agroindustrial de Petrolina–Juazeiro. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Agrônômica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

CHAVAN, B. L.; DHOTE, S.; KHAIRNAR, S. Variability in diameter, biomass and carbon stock of tropical trees under managed systems. *International Journal of Life Sciences*, v. 1, n. 2, p. 82–89, 2012.

CHAVE, J. et al. Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology*, v. 20, n. 10, p. 3177–3190, 2014.

CHAVE, J. et al. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia*, v. 145, p. 87–99, 2005.

CIFOR – CENTER FOR INTERNATIONAL FORESTRY RESEARCH. Forest carbon stocks and climate mitigation. Bogor: CIFOR, 2020.

CLARK, D. A. et al. Measuring net primary production in forests: concepts and field methods. *Ecological Applications*, v. 11, n. 2, p. 356–370, 2001.

COSTA, E. A.; SCHNEIDER, P. R.; FINGER, C. A. G. Estrutura diamétrica e dinâmica de crescimento em povoamentos nativos e cultivados. *Ciência Florestal*, v. 26, n. 3, p. 903–916, 2016. DOI: 10.5902/1980509824206.

ELIAS, M.; POTVIN, C. Assessing carbon content in tropical trees. *Biotropica*, v. 45, n. 1, p. 1–9, 2013.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Impactos das mudanças climáticas na agricultura brasileira. Brasília: Embrapa, [s.d.]. Disponível em: <https://www.embrapa.br>. Acesso em: 28 nov. 2024.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Boletim da manga: emprego – agosto 2025. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2025. Disponível em: <https://www.embrapa.br/documents/1355026/60636822/Boletim+Manga+-+Emprego+Agosto+2025/c069064b-5847-780d-4776-8aa71a65c85f>. Acesso em: 22 nov. 2025.

EPA – ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Greenhouse gas equivalencies calculator. Washington, DC, 2023. Disponível em: <https://www.epa.gov>. Acesso em: 22 nov. 2024.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. Glossary: carbon dioxide equivalent. Copenhagen: EEA, 2022. Disponível em: <https://www.eea.europa.eu>. Acesso em: 22 nov. 2024.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. Global wood density database. Rome: FAO, 2012. Disponível em: <https://www.fao.org/forestry>. Acesso em: 20 nov. 2025.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. Global wood density. Rome: FAO, 2016.

FAO. Measuring trees and forests. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2016.

FARIAS, J. S.; RAMOS, M. M.; DIAS, D. P. Crescimento e variabilidade de espécies arbóreas tropicais em sistemas de produção irrigados. *Revista Brasileira de Fruticultura*, v. 39, n. 4, p. 1–12, 2017.

FEARNSIDE, P. M. Wood density and the carbon content of trees: a review. *Forest Ecology and Management*, v. 90, p. 59–87, 1997.

FERNANDES, G. S. Volumetria — Capítulo IV. Vitória: Universidade Federal do Espírito Santo, Departamento de Ciências Florestais e da Madeira, 2009. Material didático. Disponível em: arquivo pessoal. Acesso em: 22 nov. 2025.

FIGUEIREDO, E. O.; SCHROEDER, R.; PAPA, D. de A. Fatores de forma para 20 espécies florestais comerciais da Amazônia. Rio Branco, AC: Embrapa Acre, 2009. (Comunicado Técnico, n. 173). Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/697548>. Acesso em: 22 nov. 2025.

FOELKEL, C. Densidade básica da madeira e suas implicações industriais e ambientais. *Celulose Online*, 2009.

FOELKEL, C. E. B.; BRASIL, M. A. M.; FRIZZO, S. M. B. Método de determinação da densidade básica de madeiras pelo máximo teor de umidade. *Revista IPEF*, v. 2, n. 3, p. 65–78, 1971.

GIONGO, V. et al. Agricultura de baixa emissão de carbono em regiões semiáridas: experiência brasileira. Brasília, DF: Embrapa, 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br>. Acesso em: 28 nov. 2024.

GIONGO, V. et al. Carbon accumulation in irrigated Caatinga ecosystems. *Journal of Arid Environments*, 2022.

GOMES, A. M. A. Medição dos arvoredos. Lisboa: Livraria Sá da Costa, 1957. 413 p.

GUIMARÃES, M. E. P. et al. Variação temporal da densidade da madeira e suas implicações para o estoque de carbono em *Bertholletia excelsa* na Amazônia setentrional. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA, 6., 2024, Pelotas. Anais [...]. Pelotas: SBCTEM, 2024. 8 p. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1168527>. Acesso em: 22 nov. 2025.

HUSCH, B.; BEERS, T. W.; KERSHAW, J. A. Forest mensuration. 4. ed. New York: Wiley, 2003.

HUSSAIN, S.; RAFIQ, M.; IQBAL, Z. Diameter class distribution and structural stability in managed tropical orchards. *Journal of Tropical Agriculture*, v. 54, n. 2, p. 230–238, 2016. Acesso em: 22 nov. 2025.

IBRAF — INSTITUTO BRASILEIRO DA FRUTICULTURA. Estatísticas da produção de manga no Brasil, 2023.

IMAÑA ENCINAS, J. Conceitos básicos sobre inventários florestais. Brasília: Universidade de Brasília, 1978.

IPCC — INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use. 2006.

IPCC. Climate Change 2023: Synthesis Report. Disponível em: <https://www.ipcc.ch>. Acesso em: 28 nov. 2024.

MAHAJAN, V. et al. Carbon sequestration potential of trees in arable land-use and allometric modelling for dominant tree species in sub-tropics of Jammu and Kashmir. *Journal of Environmental Biology*, v. 42, p. 414–419, 2021.

KALENDA, N.; KIGGUNDU, M.; TUMWEBAZE, S. B. Variation of basic density and wood properties along the stem of tropical hardwood species in Uganda. *Journal of Tropical Forest Science*, v. 29, n. 4, p. 456–465, 2017. Acesso em: 22 nov. 2025.

KUMAR, P.; KUMAR, S.; REDDY, Y. T. N. Growth dynamics and canopy uniformity in irrigated mango orchards under managed fertilization. *Indian Journal of Horticulture*, v. 73, n. 3, p. 356–362, 2016.

KUSHWAHA, A. et al. Effect of wood density on above-ground biomass of tropical fruit trees. *International Journal of Horticultural Forestry*, v. 14, n. 3, p. 112–120, 2022.

KUYAH, S. et al. Allometric models for estimating biomass of fruit trees in East African agroforestry systems. CIFOR-ICRAF Working Paper, 2023. Disponível em: <https://www.cifor-icraf.org>. Acesso em: 28 nov. 2024.

LIMA, J. S.; SANTOS, T. T.; SILVA, M. G. Variabilidade do crescimento e parâmetros dendrométricos em frutíferas irrigadas no semiárido. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, v. 12, n. 4, p. 2780–2791, 2018.

LITTON, C. M.; RAICH, J. W.; RYAN, M. G. Carbon allocation in forest ecosystems. *Global Change Biology*, v. 13, n. 10, p. 2089–2109, 2006.

LOUREIRO, A. A.; SILVA, J. N. M.; LIMA, R. B. Madeira da Amazônia: características e utilizações. 2. ed. Manaus: Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – INPA, 2000. 124 p. Acesso em: 22 nov. 2025.

MACHADO, S. A. et al. Equações volumétricas e fatores de forma para espécies tropicais. *Ciência Florestal*, v. 16, n. 3, p. 271–280, 2006.

MACHADO, S. A.; FIGUEIREDO FILHO, A. Dendrometria. 2. ed. Guarapuava: Unicentro, 2014.

MACHADO, S. A. *et al.* *Inventário Florestal: planejamento e execução*. 2. ed. Curitiba: UFPR, 2015.

MARTIN, A. R.; THOMAS, S. C. A reassessment of carbon content in tropical trees. *PLoS ONE*, v. 6, n. 8, p. e23533, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0023533>. Acesso em: 22 nov. 2025.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA. Fávaro visita pólo de fruticultura no Vale do São Francisco e conversa com produtores rurais. *Agência Gov.*, 18 set.2023. Disponível em: https://agenciagov.ebc.com.br/noticias/202309/favaro-visita-polo-de-fruticultura-no-vale-do-sao-francisco-e-conversa-com-produtores-rurais?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 22 nov. 2025.

NDUWAMUNGU, J. *et al.* Prediction models for aboveground biomass of tropical trees based on diameter classes: a case study in eastern Africa. *Journal of Environment and Earth Science*, v. 2, n. 9, p. 95–105, 2012.

NICOLETTI, M. F. *et al.* Acurácia de dois dendrômetros ópticos na cubagem não destrutiva para determinação da biomassa florestal. *Pesquisa Florestal Brasileira*, v. 32, n. 70, p. 139–139, 2012.

NOGUEIRA, E. M. *et al.* Wood density in forests of Brazil's 'arc of deforestation': implications for biomass and carbon stock estimates. *Forest Ecology and Management*, v. 433, p. 439–446, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.11.051>. Acesso em: 22 nov. 2025.

OLIVEIRA, J. D. M. *et al.* Produção integrada de uva no Vale do São Francisco. 2008.

OLIVEIRA, J. T. S.; BRAZOLIN, S.; TOMAZELLO FILHO, M. Caracterização tecnológica da madeira de árvores urbanas visando seu aproveitamento. *Scientia Forestalis*, v. 40, n. 95, p. 391–400, 2012. Acesso em: 22 nov. 2025.

PEREIRA, L. M. *et al.* Allometric models for fruit trees in tropical regions. *Agroforestry Systems*, 2018.

PEROSA, B. *et al.* Emissões de gases do efeito estufa pela agricultura de baixa emissão de carbono. *AgroANALYSIS*, v. 40, n. 5, p. 29–31, 2020.

PICARD, N.; SAINT-ANDRÉ, L.; HENRY, M. Manual for Building Tree Volume and Biomass Allometric Equations: From Field Measurement to Prediction. Rome: FAO/CIRAD, 2012.

PROJETO RURAL SUSTENTÁVEL CAATINGA. *Tecnologias agrícolas de baixa emissão de carbono no Semiárido*. Cadernos PRS-Caatinga, 2022. Disponível em: <https://priscaatinga.org.br>. Acesso em: 22 nov. 2025.

RAMOS, L. O. *et al.* Wood volumetry of *Tachigali vulgaris* (pure plantations in different spacing). 2021. Disponível em:

https://www.academia.edu/92182725/WOOD_VOLUMETRY_OF_Tachigali_vulgaris_PURE_PLANTATIONS_IN_DIFFERENT_PLANTING_SPACINGS. Acesso em: 20 nov. 2025.

RAVEN, P. H.; EVERT, R. F.; EICHHORN, S. E. *Biologia vegetal*. 8. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2014.

REZENDE, M. A. *et al.* Chemical composition and carbon storage in tropical hardwood species. *Brazilian Journal of Forestry Research*, 2020.

RIBEIRO, E. B. Dinâmica da matéria orgânica e fluxos de CO₂ e CH₄ em solo sob cultivo de mangueira associado com adubação verde no Semiárido. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal do Vale do São Francisco, Juazeiro-BA. Acesso em: 22 nov. 2025.

RIBEIRO, S. C. *et al.* Quantificação de biomassa e estimativa de estoque de carbono em uma capoeira da Zona da Mata Mineira. *Revista Árvore*, v. 34, n. 3, p. 495–504, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622010000300013>.

SALUNKHE, O. *et al.* Biomass accumulation and carbon storage potential of mango (*Mangifera indica*) orchards under Indian conditions. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, v. 10, n. 1, p. 2488–2492, 2021. Acesso em: 22 nov. 2025.

SANTOS, A. J. *et al.* Wood density and carbon content in tropical tree species. *BioResources*, 2018.

SARMIENTO, L.; ÁLVAREZ, J.; TAVERA, M. Carbon content and wood density variation in tropical tree species from the Brazilian Amazon. *Acta Amazonica*, v. 45, n. 2, p. 175–184, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1809-4392201401784>. Acesso em: 22 nov. 2025.

SCOLFORO, J. R. S.; FIGUEIREDO FILHO, A. *Mensuração florestal 2: volumetria*. Lavras: ESAL/FAEPE, 1993. 126 p.

UNFCCC. COP29 - UN Climate Change Conference Baku - November 2024. Disponível em: <https://unfccc.int>. Acesso em: 1 dez. 2024.

SCOLFORO, J. R. S.; THIERSCH, C. R.; MELLO, J. M. Estrutura diamétrica e modelos de distribuição para espécies arbóreas nativas. *Revista Cerne*, v. 4, n. 1, p. 1–16, 1998. Acesso em: 22 nov. 2025.

SILESHI, G. A critical review of biomass allometric equations for tropical agriculture and forestry. *Forest Ecology and Management*, v. 326, p. 1–8, 2014.

SILVA, F. C. *et al.* Estimation of tree biomass using nondestructive methods in semi-arid orchards. *CERNE*, 2020.

SMITH, D. M. *Maximum moisture content method for determining specific gravity of small wood samples*. U.S. Forest Products Laboratory Report, n. 2014, 8 p., 1954.

SOARES, C. P. B.; NETO, F. P.; SOUZA, A. L. *Dendrometria e Inventário Florestal*. 2. ed. Viçosa: UFV, 2011.

SOARES, C. P. B.; PAULA NETO, F.; SOUZA, A. L. *Dendrometria e inventário florestal*. 2. ed. Viçosa: Editora UFV, 2011. 276 p.

SOARES, C. P. B.; PAULA NETO, F.; SOUZA, A. L. *Dendrometria e inventário florestal*. 2. ed. Viçosa: Editora UFV, 2011. 276 p.

SOUZA, P. F. *et al.* Estudos fitossociológicos e dendrométricos em um fragmento de Caatinga. *Ciência Florestal*, v. 16, n. 3, p. 303–317, 2016.

STAMM, A. J. *Wood and cellulose science*. New York: The Ronald Press Company, 1964. 549 p.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. *Fisiologia e desenvolvimento vegetal*. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.

THE WOOD DATABASE. Mango (*Mangifera indica*) – Wood Properties. 2024. Disponível em: <https://www.wood-database.com/mango>. Acesso em: 20 nov. 2025.

THOMAS, S. C.; MALCZEWSKI, G. J. Wood carbon content of tree species in eastern China: Interspecific variability and the importance of the volatile fraction. *Journal of Environmental Management*, v. 85, n. 3, p. 659–662, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2006.09.001>. Acesso em: 22 nov. 2025.

THOMAS, S. C.; MARTIN, A. R. Carbon content of tree tissues: a review. *Forests*, v. 3, p. 332–352, 2012.

TIPLER, P. A.; MOSCA, G. *Física para Cientistas e Engenheiros*. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009. v. 1.

TRIVEDI, Ajaya Kumar; PANDEY, Ghanshyam; SHUKLA, Sushil Kumar; TIWARI, Jay Narayan; SINGH, Achal. *Potencial das plantações de manga (Mangifera indica L.) na retenção de carbono e serviços ecossistêmicos*. Avaliação e Gestão Ambiental Integrada, v. 21, n. 5, p. 1076–1087, set. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1093/inteam/vjaf045>.

UNFCCC — UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. GHG Data – Frequently Asked Questions. 2022.

ZANELLA, L. Crescimento e acúmulo de biomassa em espécies arbóreas no semiárido irrigado. *Revista Brasileira de Recursos Naturais*, 2014.

ZOBEL, B.; VAN BUIJTENEN, J. *Wood Variation: Its Causes and Control*. Berlin: Springer-Verlag, 1989.