



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

CURSO DE BACHARELADO EM AGRONOMIA

**ESTIMATIVA DE SEQUESTRO DE CARBONO EM POMAR DE  
GOIABEIRA (*Psidium guajava* L.) NO SUBMÉDIO DO VALE DO SÃO  
FRANCISCO**

**Ayslan Bruno Gonçalves Ramos**

PETROLINA – PE  
2025

**AYSLAN BRUNO GONÇALVES RAMOS**

**ESTIMATIVA DE SEQUESTRO DE CARBONO EM POMAR DE  
GOIABEIRA (*Psidium guajava 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 Cesar Sobreira Ferreira

PETROLINA – PE  
2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

R175      Ramos, Ayslan Bruno Gonçalves.

Estimativa de sequestro de carbono em pomar de goiabeira (*Psidium guajava L.*) no submédio do Vale do São Francisco. / Ayslan Bruno Gonçalves Ramos. - Petrolina, 2025.

35 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 Cesar Sobreira Ferreira.

1. Ciências Agrárias. 2. Biomassa. 3. Fruticultura. 4. Cubagem. 5. Sumidouro. I. Título.

CDD 630

**AYSLAN BRUNO GONÇALVES RAMOS**

**ESTIMATIVA DE SEQUESTRO DE CARBONO EM POMAR DE  
GOIABEIRA (*Psidium guajava L.*) NO SUBMÉDIO 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: 3 de dezembro de 2025.

---

Prof. Dr. Júlio Cesar Sobreira Ferreira  
IF Sertão PE Campus Petrolina Zona Rural.

---

Prof. Dra. Luciana Souza de Oliveira  
IF Sertão PE Campus Petrolina Zona Rural.

---

Profa. Dra. Elizângela Maria de Souza  
IF Sertão PE Campus Petrolina Zona Rural.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço a Deus pela saúde, sabedoria e força que me sustentaram em cada desafio desta trajetória acadêmica. Sem sua presença, nenhum dos passos até aqui teria sido possível.

Manifesto minha profunda gratidão ao Senhor Pedro Siqueira, proprietário da área onde este estudo foi realizado, pela confiança depositada, pela autorização de acesso ao pomar e pelo apoio concedido ao longo de todas as etapas da pesquisa. Sua colaboração foi essencial para que este trabalho alcançasse precisão metodológica e relevância científica.

Aos professores do Instituto Federal do Sertão Pernambucano – Campus Petrolina Zona Rural, agradeço pelo conhecimento transmitido, pelo compromisso com a formação acadêmica e pelo exemplo de ética profissional. Em especial, registro meu apreço aos professores que compõem a banca avaliadora: Prof. Dr. Júlio Cesar Sobreira Ferreira, meu orientador, pela orientação comprometida, pelas discussões técnicas enriquecedoras, pela exigência científica e pela confiança depositada durante o desenvolvimento deste trabalho; Prof. Dra. Luciana de Souza de Oliveira, pelas contribuições criteriosas, observações detalhadas e incentivo à precisão metodológica. Assim como a Profa. Dra. Elizângela Maria de Souza, pelas valiosas considerações, pelo olhar técnico sensível e pelas contribuições que enriqueceram de forma significativa a construção científica deste TCC.

Agradeço ainda aos demais professores e servidores do IFSertãoPE Campus Petrolina Zona Rural, pela formação sólida proporcionada, pelo apoio institucional e pela infraestrutura disponibilizada, fundamentais para minha evolução acadêmica e pessoal ao longo do curso de Agronomia.

À minha namorada, Pétala Rayana Pereira da Silva, expresso meu mais sincero reconhecimento. Sua presença constante nas coletas de dados, seu apoio emocional, paciência e incentivo diário foram fundamentais para a concretização deste estudo. Em muitos momentos, sua dedicação ultrapassou o papel de acompanhante e se integrou de forma decisiva ao desenvolvimento da pesquisa.

Aos colegas de turma e amigos que compartilharam momentos de estudo, desafios, conversas e motivações, deixo minha sincera gratidão. Cada gesto de apoio contribuiu de forma especial para que esta jornada fosse concluída.

Por fim, estendo meus agradecimentos a todos que, direta ou indiretamente, colaboraram para a realização deste Trabalho de Conclusão de Curso. Este resultado representa não apenas um esforço individual, mas a soma de muitas mãos, palavras e caminhos compartilhados.

## RESUMO

O sequestro de carbono na fruticultura tem ganhado relevância diante do avanço das mudanças climáticas e do aumento das concentrações atmosféricas de CO<sub>2</sub>, resultantes de atividades antrópicas, como uso de combustíveis fósseis e o desmatamento. Em cultivos perenes, especialmente em ambientes irrigados, o acúmulo de biomassa contribui para a formação de “sumidouros de carbono” de longa duração, ou seja, remover CO<sub>2</sub> atmosférico e seu armazenamento em reservatório, reduzindo a concentração do gás de efeito estufa e contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas. A goiabeira (*Psidium guajava* L.) destaca-se nesse contexto pela elevada produtividade, densidade da madeira e longevidade, características que favorecem o armazenamento contínuo de carbono ao longo dos anos. O presente trabalho teve como objetivo estimar o volume de madeira, a biomassa e o carbono fixado em um pomar comercial de goiabeira localizado no Projeto N10, Petrolina - PE, propriedade do senhor Pedro Siqueira, região de forte expressão da fruticultura irrigada no Submédio do Vale do São Francisco. A pesquisa foi conduzida mediante inventário florestal, com delineamento amostral composto por 10 parcelas, com 9 plantas cada e espaçamento entre plantas de 6 x 4 m, totalizando 216 m<sup>2</sup> por parcela, em uma área total de 2,9 ha e 1208 plantas. Foram medidos os valores de circunferência à altura do peito (CAP), diâmetro (DAP), diâmetro equivalente para árvores bifurcadas ( $DAP_{eq}$ ) e altura, conferindo valores médios por planta de 2,17 m de altura; CAP<sub>b</sub> de 26,51 cm; CAP de 7,95 cm,  $DAP_{eq}$  de 8,55 cm; volume médio de 0,0063 m<sup>3</sup>; Biomassa de 4,27 kg; e C0<sub>2eq</sub> de 7,42 kg e média de 2,82 t de C0<sub>2eq</sub> /ha-1. A aplicação de métodos indiretos de cubagem mostrou-se eficaz, permitindo estimativas de captura de carbono nos fustes da goiabeira sem necessidade de procedimentos destrutivos. Conclui-se que cultivos perenes irrigados do semiárido do Submédio do Vale do São Francisco, podem desempenhar importante função na mitigação de gases de efeito estufa, cenário para crédito de carbono e preservação da microbiota do solo, especialmente quando manejados com técnicas que favoreçam o incremento de biomassa ao longo do ciclo produtivo. O estudo reforça a necessidade de ampliar pesquisas envolvendo a fruticultura, para consolidar bases científicas sobre o estoque e a dinâmica do carbono em sistemas agrícolas de alto desempenho.

**Palavras-chave:** Biomassa; Fruticultura; Cubagem; Sumidouro.

## ABSTRACT

Carbon sequestration in fruit farming has gained relevance in the face of advancing climate change and increasing atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations resulting from anthropogenic activities, such as fossil fuel use and deforestation. In perennial cropping systems, especially under irrigated conditions, biomass accumulation contributes to the formation of long-term carbon sinks, that is, the removal of atmospheric CO<sub>2</sub> and its storage in reservoirs, thereby reducing greenhouse gas concentrations and contributing to climate change mitigation. Guava (*Psidium guajava* L.) stands out in this context due to its high productivity, wood density, and longevity, characteristics that favor continuous carbon storage over the years. This study aimed

to estimate wood volume, biomass, and fixed carbon in a commercial guava orchard located in Project N10, Petrolina, Pernambuco State, Brazil, owned by Mr. Pedro Siqueira, a region of strong expression of irrigated fruit farming in the Lower Submédio do Vale do São Francisco. The research was conducted through a forest inventory using a sampling design composed of 10 plots, each containing nine plants, with a spacing of  $6 \times 4$  m, totaling  $216\text{ m}^2$  per plot, within a total area of 2.9 ha and 1,208 plants. Measurements included circumference at breast height (CBH), diameter at breast height (DBH), equivalent diameter for bifurcated trees (DBH\_eq), and total height, resulting in mean values per plant of 2.17 m in height; CBH\_b of 26.51 cm; CBH of 7.95 cm; DBH\_eq of 8.55 cm; mean volume of  $0.0063\text{ m}^3$ ; biomass of 4.27 kg; and CO<sub>2</sub> equivalent (CO<sub>2</sub>eq) of 7.42 kg, with an average of  $2.82\text{ t CO}_2\text{eq ha}^{-1}$ . The application of indirect cubing methods proved to be effective, allowing the estimation of carbon sequestration in guava stems without the need for destructive procedures. It is concluded that irrigated perennial crops in the semi-arid region of the São Francisco Valley can play an important role in mitigating greenhouse gas emissions, representing a potential scenario for carbon credits and soil microbiota preservation, especially when managed using practices that enhance biomass accumulation throughout the productive cycle. The study highlights the need to expand research on fruit farming to consolidate scientific bases on carbon stocks and dynamics in high-performance agricultural systems.

**Keywords:** Biomass; Fruit farming; Cubing; Sink.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>8</b>
<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>10</b>
<b>2.1 Objetivo geral.....</b>	<b>10</b>
<b>2.2 Objetivos específicos .....</b>	<b>10</b>
<b>3 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>11</b>
<b>3.1. Caracterização da Goiabeira (<i>Psidium guajava L.</i>).....</b>	<b>13</b>
<b>3.2. Fundamentos do sequestro de carbono em plantas .....</b>	<b>14</b>
<b>3.3. Atuação da “4C” no contexto do sequestro de carbono no solo....</b>	<b>14</b>
<b>4 MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>18</b>
<b>4.1 Delineamento amostral e seleção das plantas.....</b>	<b>19</b>
<b>4.1.1 Conversão biomassa → carbono .....</b>	<b>21</b>
<b>4.2 Análise estatística da distribuição de diâmetros e alturas .....</b>	<b>23</b>
<b>4.2.1 Análise descritiva das variáveis dendrométricas .....</b>	<b>23</b>
<b>4.2.2 Verificação de normalidade da distribuição.....</b>	<b>24</b>
<b>4.2.3 Análise de correlação entre altura e diâmetro .....</b>	<b>25</b>
<b>4.2.4 Distribuição em classes de tamanho .....</b>	<b>26</b>
<b>4.2.5 Análise estatística por parcela .....</b>	<b>26</b>
<b>4.2.6 Geração de visualizações gráficas .....</b>	<b>27</b>
<b>4.2.7 Procedimentos computacionais.....</b>	<b>28</b>
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>29</b>
<b>5.1 Caracterização e distribuição dendrométrica .....</b>	<b>29</b>
<b>5.1.1 Caracterização da altura das plantas.....</b>	<b>29</b>
<b>5.1.2 Caracterização do diâmetro à altura do peito (DAP) .....</b>	<b>31</b>
<b>5.1.3 Relação entre altura e diâmetro .....</b>	<b>33</b>
<b>5.2 Distribuição por classes de tamanho .....</b>	<b>34</b>
<b>5.2.1 Distribuição de plantas por classe de DAP .....</b>	<b>34</b>

<b>5.3 Interpretação integrada das distribuições.....</b>	<b>35</b>
<b>5.4 Implicações para estimativa de volume e sequestro de carbono ....</b>	<b>35</b>
<b>5.5 Qualidade e representatividade da amostra.....</b>	<b>36</b>
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>39</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>40</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas representam um dos maiores desafios ambientais da atualidade, impulsionadas principalmente pelo aumento das concentrações atmosféricas de gases de efeito estufa (GEE), como o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ) e óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) (IPCC, 2021). O efeito estufa, embora seja um processo natural e essencial para a manutenção da temperatura média da Terra, tem sido intensificado pelas atividades antrópicas desde a Revolução Industrial, resultando em aquecimento global, alterações nos regimes hidrológicos e aumento da frequência de eventos extremos (STOCKER *et al.*, 2013). Nesse contexto, práticas agrícolas sustentáveis e a fruticultura surgem como ferramentas de controle de tais problemas, por seu potencial de atuar como sumidouros de carbono, contribuindo para a mitigação desses impactos.

A goiabeira, tradicionalmente cultivada no Nordeste brasileiro, tem ganhado destaque comercial e produtivo no Submédio do Vale do São Francisco, região caracterizada pela fruticultura irrigada de alta eficiência. Além de sua relevância econômica, a cultura apresenta importante função ecológica, sobretudo pela capacidade de sequestrar carbono atmosférico e armazená-lo na biomassa aérea (tronco, galhos, folhas) e subterrânea (sistema radicular), bem como de contribuir para a estabilização do carbono orgânico do solo (BATISTA *et al.*, 2020).

Como espécie perene de porte arbóreo, a goiabeira possui crescimento contínuo ao longo dos anos, com manejo de podas constantes para produção, o que favorece o acúmulo de biomassa lenhosa, onde ocorre o armazenamento de carbono de longa duração (BROWN; LUGO, 1984). A cultura em Petrolina, localidade do presente trabalho, intensifica esse potencial devido ao aumento da taxa fotossintética, maior vigor vegetativo e ciclos produtivos mais longos.

Outro componente essencial no processo de sequestro de carbono é o solo, que representa o maior reservatório terrestre de carbono orgânico, ultrapassando a quantidade presente na vegetação (FAO, 2017).

A dinâmica do carbono no solo está diretamente relacionada à atividade microbiana, que controla os processos de decomposição, mineralização e estabilização da matéria orgânica. Microrganismos do solo desempenham papel decisivo na formação de húmus, proteção físico-química da matéria orgânica do solo

e o equilíbrio do ambiente biótico, influenciando diretamente a taxa de acúmulo ou perda de carbono (SIX *et al.*, 2002; LEHMANN; KLEBER, 2015). Em sistemas irrigados e bem manejados, essa atividade tende a ser favorecida, aumentando a incorporação de carbono a longo prazo.

No Nordeste brasileiro, fatores como elevada radiação solar, manejo intensivo da irrigação e práticas de adubação contribuem para que a cultura e a fruticultura de forma geral, apresente elevada capacidade de fixação de carbono. Estudos indicam que frutíferas como a goiaba, manga e uva podem funcionar como importantes sumidouros de carbono quando submetidas a práticas conservacionistas, incluindo manejo adequado do solo, uso de cobertura vegetal e minimização de revolvimento (CAVALCANTE *et al.*, 2022; SILVA *et al.*, 2020).

Pensando nesse contexto, este trabalho buscou estimar e analisar o sequestro de carbono em pomar comercial de goiabeira, na cidade de Petrolina - PE, estimando volume de madeira, biomassa, carbono armazenado e CO<sub>2</sub> equivalente. O estudo está ancorado na necessidade de quantificar o potencial de cultivos perenes irrigados como estratégias mitigadoras das mudanças climáticas, bem como fornecer subsídios técnicos para o manejo sustentável da fruticultura no semiárido brasileiro.

A pesquisa parte da necessidade de compreender o potencial do cultivo perene irrigado da fruticultura na goiaba no Submédio do Vale do São Francisco, como estratégia de mitigação das mudanças climáticas, além de oferecer informações técnicas que contribuam para o manejo mais sustentável da fruticultura no semiárido brasileiro e servir como porta para o avanço do mercado de crédito de carbono no Vale, auxiliando ainda mais a produção dos agricultores, assim como aporte de valor a fruta e ao processo de produção do produtor.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo geral

Estimar, por meio da cubagem não destrutiva de árvores, o volume de madeira e carbono sequestrado, avaliando o potencial de sequestro de carbono em um pomar comercial de goiabeira no cultivo irrigado do Submédio do Vale do São Francisco.

### 2.2 Objetivos específicos

- Evidenciar os parâmetros dendrométricos das árvores amostradas.
- Estimar o volume individual de madeira das árvores avaliadas utilizando equações clássicas de mensuração florestal adaptadas para espécies frutíferas de fuste irregular.
- Analisar estatisticamente a variabilidade dos dados, determinando erro amostral, coeficiente de variação e distribuição das variáveis dendrométricas, volumétricas e de carbono.
- Discutir o potencial da cultura da goiabeira como sumidouro de carbono no semiárido e sua contribuição para a mitigação das mudanças climáticas, incremento comercial e benefícios para o meio ambiente.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

Universalmente, o carbono é regulado por fluxos contínuos entre atmosfera, biosfera, litosfera e oceanos. Na atmosfera, o carbono aparece majoritariamente como CO<sub>2</sub>, porém nota-se aumento desde a Revolução Industrial, decorrente da queima de combustíveis fósseis, mudança do uso da terra e desmatamento (IPCC, 2021). Esse acréscimo, ao decorrer dos anos, tem intensificado problemas, como o efeito estufa, mecanismo pelo qual gases atmosféricos absorvem radiação infravermelha, retendo calor e elevando a temperatura média do planeta (DIAS, 2006).

Nesse cenário de mitigação climática, as plantas exercem papel importante, devido a inúmeros fatores, dentre eles, o fato de realizarem fotossíntese. No setor florestal, modelos de crescimento e produção volumétrica são utilizados nas investigações que quantificam o teor de carbono presente em uma floresta ou pomar, de tal forma que vem se tornando comum o interesse nas formas de cubagem de plantas, devido ao desejo com relação à captura de carbono por esses ecossistemas, tornando-se em ferramenta de mensuração ambiental. (SCHROEDER, 1992).

Taiz *et al.* (2017) afirmam que o sequestro de carbono pela vegetação consiste na capacidade das plantas de capturar dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) atmosférico, dando início ao processo biofísico fundamentado primariamente na fixação fotoquímica de CO<sub>2</sub> durante a fotossíntese, seguido pela alocação, conversão bioquímica e estocagem do carbono absorvido em diferentes compartimentos vegetais. A fotossíntese atua, portanto, como a porta de entrada molecular do carbono atmosférico para a biomassa vegetal, convertendo-o em biomassa estrutural sob a forma de compostos orgânicos.

Durante a fase bioquímica, conhecida como Ciclo de Calvin, o CO<sub>2</sub> atmosférico é difundido para o interior da folha, quando no estroma, ocorre a etapa decisiva: carboxilação da ribulose-1,5-bisfosfato (RuBP), quando a enzima Rubisco catalisa, formando então a transição do CO<sub>2</sub> gasoso para carbono orgânico estável, agora incorporado na molécula de 3-PGA, posteriormente reduzido a gliceraldeído-3-fosfato (G3P) através de reações dependentes de ATP e NADPH. Capturando CO<sub>2</sub> atmosférico para a síntese de estruturas, convertendo-o em especialmente em

carboidratos estruturais como: celulose, lignina e hemicelulose, promovendo sequestro de carbono (UFRB, 2023).

Em sistemas agrícolas, especialmente aqueles com espécies perenes, a vegetação funciona como sumidouro de carbono, acumulando biomassa aérea e radicular e reduzindo a concentração atmosférica de CO<sub>2</sub> (LAL, 2004; SMITH *et al.*, 2014).

Na goiabeira o estoque de carbono tende a ser mais significativo devido à longevidade das plantas, ao acúmulo de madeira e ao incremento periódico de biomassa aérea e subterrânea. Assim sendo, essas frutíferas mantêm acúmulo contínuo de biomassa por muitos anos, sustentando estoques de carbono mais estáveis (MONTAGNINI; NAIR, 2004).

Esses sistemas agrícolas têm potencial elevado de mitigação dos problemas climáticos por apresentarem alta produtividade, temperaturas que favorecem rápido crescimento vegetal e longo período fotossintético anual (BEER *et al.*, 2010). Práticas como manejo conservacionista, irrigação eficiente, adubação equilibrada e manutenção de resíduos culturais podem ampliar o estoque de carbono nesses sistemas (PAUSTIAN *et al.*, 2016). Cenário condizente com toda a região de extrema importância e avanço tecnológico na produção frutífera irrigada mundial.

Na fruticultura, a biomassa arbórea inclui tronco, ramos, folhas, frutos e raízes, são permanentes ou renovados constantemente por podas. A combinação de longevidade, elevada densidade da madeira e produção anual de tecidos novos caracteriza esses sistemas como reservatórios de carbono de longo prazo (HAIRIAH *et al.*, 2011).

No Submédio do Vale do São Francisco, essa oportunidade é ainda mais clara, demonstrando a possibilidade de bom desempenho no sequestro desse carbono, considerando o fato de que em regiões como o Nordeste, apresenta-se uma ampla adoção de fruticultura irrigada, manejo constante de adubação e renovação de vigor através de podas, aumentando ainda mais a capacidade de fixação de carbono devido ao maior vigor vegetativo e produtividade (SANTOS *et al.*, 2019).

### **3.1. Caracterização da Goiabeira (*Psidium guajava* L.)**

A goiabeira é uma espécie arbórea da família Myrtaceae, com porte variando entre 3 e 10 metros, tronco tortuoso e copa densa. O sistema radicular é profundo, permitindo exploração eficiente de água e nutrientes (PÉREZ *et al.*, 2013). A biomassa estrutural é distribuída em:

- Biomassa do tronco e galhos: elevada proporção de lenho, com densidade da madeira variando entre 674 kg/m<sup>3</sup> (LUCAS *et al.*, 2006).
- Folhas: renovadas continuamente, com alta taxa fotossintética típica de espécies tropicais.
- Raízes: representam aproximadamente 20 - 30% da biomassa total em espécies frutíferas de porte semelhante (HAIRIAH *et al.*, 2011).

Importante ressaltar, que a produção de frutos, embora seja temporária, vai contribuir para o fluxo de carbono dentro do sistema. Mas, não para o estoque permanente, pois são removidos para consumo. Possui ciclo perene, com vida produtiva de 10 a 20 anos em sistemas comerciais irrigados, podendo ultrapassar 30 anos em condições naturais. A longevidade é determinante para o acúmulo de carbono, porque prolonga o período de crescimento do lenho e raízes.

O Brasil está entre os maiores produtores de goiaba do mundo, com destaque para o Nordeste, especialmente Pernambuco, Bahia e Paraíba, onde sistemas irrigados garantem elevada produtividade anual (IBGE, 2023). A fruticultura é estratégica para o agronegócio regional e para a agricultura familiar, agregando valor, promovendo geração de renda e fortalecendo cadeias agroindustriais de polpas e sucos. Além do papel econômico, a goiabeira em cultivos comerciais irrigados apresenta desenvolvimento vegetativo intenso, o que reforça seu potencial como sumidouro de carbono (SANTOS *et al.*, 2022).

O Submédio do Vale do São Francisco permite grande avanço no sequestro de carbono, unindo técnica como irrigação, podas, indução floral, adubação e nutrição, controle fitossanitário e organização de calendário de produção, além de disponibilidade de produção durante todo o ano, com 2 safras. Conjunto de práticas que aumenta a biomassa aérea e radicular trabalhadas, impactando positivamente o sequestro de carbono ao longo dos anos. Além de que em sistemas perenes como a

goiabeira, a ciclagem contínua aumenta o carbono estável do solo ao longo dos anos (PAUSTIAN *et al.*, 2016).

### **3.2. Fundamentos do sequestro de carbono em plantas**

Diferença entre sequestro, armazenamento e fluxo de CO<sub>2</sub>. Sequestro de carbono: captação de CO<sub>2</sub> atmosférico e incorporação nas moléculas orgânicas via fotossíntese. Armazenamento de carbono: retenção de carbono na biomassa ou no solo por determinado período. Fluxo de CO<sub>2</sub>: movimento dinâmico de carbono através de fotossíntese, respiração, decomposição e exportação via colheita (LAL, 2004).

Nesse contexto, o sequestro por vegetação, surge como uma estratégia fundamental para mitigar impactos, onde as goiabeiras funcionam, como não apenas uma ferramenta ecológica, mas também uma estratégia socioeconômica valiosa para enfrentar o aquecimento global. Além de serem um caminho para o mercado de créditos de carbono.

Esse mercado surgiu como uma das principais estratégias econômicas para atenuar o aquecimento global, permitindo que atividades capazes de remover ou reduzir emissões de CO<sub>2</sub> gerem unidades comercializáveis, denominadas *carbon credits* ou Reduções Certificadas de Emissões (RCEs), cada uma equivalente a 1 tonelada de CO<sub>2</sub> não emitida ou removida da atmosfera (LECOCQ; AMBROSI, 2007; WORLD, 2022).

### **3.3. Atuação da “4C” no contexto do sequestro de carbono no solo.**

Não se poderia deixar de abordar a empresa 4C - Soluções Inteligentes em Carbono, sendo uma empresa que representa claramente o conteúdo desse TCC sobre a fruticultura e a goiabeira. Atua no setor, oferecendo uma metodologia voltada para a quantificação, monitoramento e valorização do carbono estocado no solo. A proposta central da empresa é demonstrar que sistemas agrícolas quando manejados de forma sustentável têm alto potencial de remover CO<sub>2</sub> atmosférico, convertendo-o em carbono orgânico estável. Esse processo, além de gerar créditos de carbono,

beneficia diretamente o produtor por melhorar características físico-químicas do solo, como estrutura, retenção hídrica e fertilidade.

A metodologia empregada pela 4C baseia-se na coleta georreferenciada de amostras de solo, seguida de análise laboratorial utilizando sensores NIR (Near Infrared Spectroscopy). A combinação desses sensores com modelos matemáticos estima o teor de carbono orgânico do solo, precisão e menor impacto ambiental, evitando métodos tradicionais mais caros e dependentes de reagentes químicos. A partir desses dados, a empresa elabora mapas de estoque de carbono, inventários técnicos e relatórios de potencial de geração de créditos, além de monitorar a evolução dos estoques ao longo do tempo (4C, 2025).

A empresa viabiliza a participação de produtores rurais no mercado voluntário de carbono, fortalecendo estratégias de descarbonização e conformidade ambiental. Também faz o mapeamento contínuo do carbono no solo para que propriedades rurais se alinhem a políticas públicas, programas ESG e metas globais de neutralidade climática, consolidando o setor agrícola como agente ativo na mitigação das mudanças climáticas.

Tendo em vista essa realidade, a goiabeira produzida pelo senhor Pedro Siqueira e outros agricultores da região entra, portanto, como visão de um contexto onde sistemas perenes com elevada capacidade de acúmulo de biomassa, têm sido reconhecidos como potencial provedor de serviços ambientais, pois apresentam produtividade contínua que favorecem a estocagem de carbono de longo prazo.

A criação de créditos depende da quantificação precisa do carbono fixado, seguindo metodologias padronizadas, como as diretrizes do IPCC (2006), que estabelecem fatores de conversão biomassa-carbono e protocolos de monitoramento, relato e verificação (MRV). Dessa forma, ao estimar volume de madeira, biomassa e carbono estocado na goiabeira, o presente trabalho fornece bases técnicas que permitem considerar o potencial dessa cultura no contexto de programas de compensação e mercados voluntários de carbono, nos quais sistemas frutíferos irrigados do semiárido brasileiro podem se converter em importantes sumidouros e geradores de créditos.

Embora ainda sejam escassas as pesquisas focadas especificamente na retenção de carbono em plantações de goiabeira, práticas sustentáveis aplicadas em cultivos frutíferos do semiárido brasileiro, como no caso da própria goiabeira, apresentam potencial relevante para contribuir com esse processo. Medidas como a

diminuição do revolvimento do solo, o enriquecimento orgânico e a implementação de sistemas de produção integrados se mostram estratégias eficazes para ampliar o sequestro de carbono em áreas agrícolas.

O estudo foi desenvolvido com base no setor florestal e nas referências encontradas. Modelos de crescimento e produção volumétrica são utilizados nas investigações que quantificam o teor de carbono presente em uma floresta ou pomar. No entanto, existe a necessidade de conhecer os estoques de carbono presentes em diferentes compartimentos da floresta (parte aérea das árvores, sistema radicular, solo, entre outros) para se conhecer o potencial no sequestro, bem como a sua viabilidade econômica.

Trabalhos têm sido realizados, utilizando-se estimativas de volume e biomassa em diferentes partes das árvores e em compartimentos das florestas, as quais são convertidas em quantidades de carbono pela utilização de fatores de conversão, ou seja, a quantidade de carbono estocada nas florestas normalmente é obtida de forma indireta (COOPER, 1983). Principalmente devido ao custo elevado para obtenção da quantidade de carbono presente em diferentes compartimentos da floresta.

Dentre as diferentes abordagens para estimar o volume de árvores encontradas na literatura, os métodos indiretos ganham destaque por sua agilidade e precisão, baseando-se no uso de coeficientes de forma como parâmetro para calcular o volume arbóreo (CAMPOS, 1988).

A quantificação direta da biomassa que envolve o corte, separação, secagem e pesagem das partes das plantas é considerada o método mais preciso. Mas, é inviável em escala comercial por ser destrutivo e complexo. Por isso, utiliza-se métodos indiretos baseados em modelos alométricos que estimam o volume e a biomassa a partir de medições dendrométricas simples, como diâmetro e altura (BROWN *et al.*, 1986). Assim sendo, torna-se necessário utilizar metodologias que possibilitem obter estimativas da quantidade de carbono na fruticultura. Nesta investigação, para gerar os dados do inventário florestal, foram identificados todos os indivíduos arbóreos, tendo suas medidas de diâmetro, altura e qualidade do fuste obtidas. O modelo clássico de Imañá Encinas (1978), utilizado para diversas espécies lenhosas, estima o volume individual como o produto da área basal, da altura total e de um fator de forma parâmetro que representa a relação geométrica entre um tronco real e um cilindro perfeito.

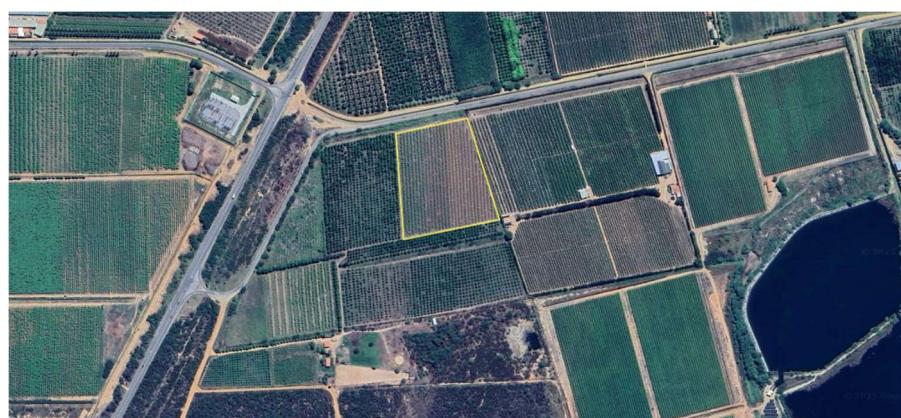
A biomassa lenhosa estimada é convertida em carbono utilizando-se fatores de conversão buscados na literatura. Em espécies lenhosas tropicais, o teor médio de carbono corresponde a aproximadamente 50% da biomassa. Assim, metodologias consolidadas adotam fatores fixos para conversão, com o valor de 0,5 sendo o mais utilizado em inventários de cultivos perenes. Após estimar o carbono, é possível quantificar o equivalente em dióxido de carbono removido da atmosfera  $\text{CO}_{2\text{eq}}$ , multiplicando-se o estoque de carbono pelo fator estequiométrico 3,67 correspondentes à razão entre os pesos moleculares de  $\text{CO}_2$  e C (SOARES *et al.*, 2006).

#### **4 MATERIAL E MÉTODOS.**

Foram avaliadas 90 árvores-amostra de goiabeiras. O estudo foi desenvolvido em um pomar comercial de goiabeira localizado no Projeto de Irrigação N10, município de Petrolina, Pernambuco. A área total possui 2,9 ha, cultivada no espaçamento  $6 \times 4$  m, totalizando 1.208 plantas em fase produtiva, com 4 anos de idade. O clima predominante é semiárido, com baixa pluviosidade entre 400 mm e 800 mm média anual, elevada evapotranspiração anual, características que influenciam o crescimento e a densidade da madeira de espécies frutíferas (KOPPEN., 2018).

Figura 1 - Área do produtor Pedro Siqueira. Local: Projeto de Irrigação N10 – Petrolina (PE).

9°17'40"S 40°26'36"W



Fonte - Google Earth, (2025).

Figura 2 - Área das plantas-amostras (N10 - Petrolina). 29.793,4 m<sup>2</sup>.



Fonte - Google Earth, (2025).

A quantificação da biomassa presente nas plantas, foi realizada por meio da coleta de informações dendrométricas, sem a necessidade de realizar o corte dos exemplares. Nesse cenário, pesquisas que propuseram e refinaram técnicas de mensuração volumétrica com base em medições não invasivas têm desempenhado papel relevante na gestão e no aproveitamento racional dos recursos florestais.

#### **4.1 Delineamento amostral e seleção das plantas**

Nesta investigação, para gerar os dados do inventário florestal, foram identificados todos os indivíduos arbóreos e sorteados de forma aleatória na área estudada, formando 10 parcelas de 9 plantas cada, com 216 m<sup>2</sup> por parcela. Considerando somente circunferências ≥ 5 cm a 1,3 metros de altura CAP, tendo suas medidas de diâmetro, altura e qualidade do fuste obtidas. Para identificar:

- *CAP* - Circunferência à altura do peito (1,30 m do solo); unidade: cm.
- *DAP* - Diâmetro à altura do peito; unidade: cm.
- *DAP<sub>eq</sub>* - Diâmetro equivalente para árvores bifurcadas; unidade: cm.
- Área basal (*g*) - Área da seção transversal do tronco; unidade: m<sup>2</sup>.
- Volume de madeira (*V*) - Estimativa volumétrica da planta; unidade: m<sup>3</sup>.
- Biomassa aérea (*B*) - Biomassa lenhosa estimada; unidade: t (toneladas).
- Carbono estocado (*C*) - Quantidade de carbono na biomassa; unidade: t C (toneladas de carbono).
- Carbono equivalente *CO<sub>2eq</sub>* - Conversão do C para dióxido de carbono equivalente (C × 3,67); unidade: t *CO<sub>2e</sub>* .

Onde foram avaliadas quanto à sua distribuição espacial, bem como em relação ao volume de madeira, à biomassa e à quantidade de carbono capturado. A metodologia adotada para a coleta dos dados dendrométricos consistiu na seleção e enumeração completa dos indivíduos arbóreos, realizada por meio de sorteio aleatório que abrangeu toda a área cultivada com goiabas. Os diâmetros à altura do peito DAP, medidos a 1,30 metros do solo, foram determinados com o uso de fita métrica diretamente nos troncos das árvores, transformando a medida de circunferência em diâmetro, por meio da seguinte fórmula:

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

Em que:

$DAP$  = Diâmetro a altura do peito.

$CAP$  = Circunferência à altura do peito.

$\pi = 3,14$

A área basal ( $g$ ) foi obtida através da fórmula:

$$g = \frac{\pi (DAP^2)}{4}$$

O fator de forma ( $ff$ ) foi utilizado como 0,5 baseando-se nas estimativas que apontam fator de forma preconizado pelos órgãos oficiais de licenciamento ambiental, e por pesquisadores como Heinsdijk e Bastos (1963).

A estimativa da biomassa aérea viva foi realizada a partir da multiplicação entre o volume de madeira estimado para cada árvore e a densidade básica da madeira correspondente à espécie analisada. Para quantificar o carbono armazenado, foi aplicado o fator de conversão de 0,5 à biomassa lenhosa estimada, conforme indicado por (SOARES *et al.* 2006).

Nas árvores da goiabeira, ocorrem naturalmente muitas bifurcações no seu fuste a 1,30 m do solo, fazendo necessário utilizar o diâmetro equivalente  $DAP_{eq}$  para obtenção dos volumes. O  $DAP_{eq}$  presume que a área seccional de uma árvore, com várias ramificações (fustes), é compreendida pelo somatório das áreas seccionais de cada fuste de forma individual (SOUZA *et al.*, 2016; SILVA, 2005; FRAGA *et al.*, 2014). Fórmula para  $DAP_{eq}$  em plantas bifurcada:

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

Em que:

$DAP_{eq}$ = Diâmetro equivalente da soma dos DAP bifurcados.

A estimativa do volume de madeira foi realizada utilizando uma equação clássica de mensuração florestal, proposta por Imañá Encinas (1978), cuja aplicação é amplamente reconhecida na literatura especializada.

$$V = g \cdot h \cdot ff$$

Onde:

$V$  = volume da árvore  $m^3$ .

$g$  = área basal da árvore em  $cm^2$ .

$h$  = altura total em m.

$ff$  = fator de forma.

Usada densidade básica da madeira ( $\rho$ ) - madeira da goiabeira, definida como volume verde  $m^3$ , a biomassa por árvore é:

$$B = \rho * V$$

Unidades:

$V$  - em  $m^3$ .

$\rho$  - em  $kg \cdot m^{-3}$

$B$  em kg, converter para toneladas (t) divide por 1000.

#### 4.1.1 Conversão biomassa → carbono

De acordo com *IPCC 2006 - Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories - Volume 4*, a fração de carbono para biomassa lenhosa é de 0,50 t C / t de biomassa, para plantas lenhosas e 0,47 para herbáceas.

A massa de carbono por árvore (em kg) é:

$$C = B * cf$$

Onde:

$cf$  = Fração de carbono na biomassa.

Conversão para CO<sub>2</sub> equivalente - Para obter o equivalente em CO<sub>2</sub> removido:

$$CO_2 = C * \frac{44}{12} \simeq C * 3,67$$

Para converter toneladas de carbono para toneladas de CO<sub>2</sub>, multiplica-se por 44/12 (razão entre a massa molecular do CO<sub>2</sub> e a do C (SOARES *et al.*, 2006).

Os dados obtidos foram submetidos a uma análise estatística descritiva, utilizando valores absolutos e percentuais relacionados ao número de árvores avaliadas. Foi considerado variáveis como diâmetro à altura do peito (DAP) e altura total, a partir das quais será determinado o volume estimado de madeira, seguido do cálculo da biomassa e do carbono fixado por árvore.

Figuras 3: Área de plantas-amostras.



Fonte: Arquivo pessoal.

## 4.2 Análise estatística da distribuição de diâmetros e alturas

Após a coleta de todas as medições dendrométricas (altura total, circunferência à altura do peito - CAP, e múltiplas circunferências ao longo do fuste para cálculo do DAP equivalente), os dados foram organizados em planilha eletrônica Microsoft Excel (versão 2025) e posteriormente processados utilizando linguagem de programação Python 3.10 com bibliotecas especializadas (NumPy 1.24 e Pandas 2.0) para garantir consistência, rastreabilidade e reproduzibilidade das análises.

Os 90 indivíduos amostrados foram distribuídos em 10 parcelas de 9 plantas cada (as 10 parcelas do delineamento amostral). Para cada indivíduo, foram registrados:

- Altura total (H) em metros (m)
- Circunferência à altura do peito (CAP) em centímetros (cm) - medida a 1,30 m do solo
- Diâmetro equivalente (DAP) em centímetros (cm) - calculado pela relação  $DAP = CAP/\pi$  para troncos simples, ou  $DAP = \sqrt{(DAP_1^2 + DAP_2^2 + \dots + DAP_n^2)}$  para troncos bifurcados (FRAGA, et al. 2014).

### 4.2.1 Análise descritiva das variáveis dendrométricas

Para cada variável dendrométrica (altura e DAP), foram calculados os seguintes descriptores estatísticos:

#### a) Medidas de Tendência Central:

- Média aritmética ( $\bar{X}$ ):  $\Sigma \text{ valores} / n$
- Mediana (Med): Valor central da distribuição ordenada
- Moda: Valor mais frequente

#### b) Medidas de Dispersão:

- Desvio Padrão (DP):  $\sqrt{[\Sigma (Xi - \bar{X})^2 / (n-1)]}$

- Coeficiente de Variação (CV):  $(DP/\bar{X}) \times 100$
- Amplitude (A): Máximo - Mínimo
- Intervalo Interquartil (IQR): Q3 - Q1

c) Quartis e Percentis:

- Q1 (25º percentil)
- Q2 = Mediana (50º percentil)
- Q3 (75º percentil)

As classificações de coeficiente de variação seguiram Campos (1988):

- CV < 10%: Baixo
- CV entre 10-20%: Moderado
- CV > 20%: Alto

#### 4.2.2 Verificação de normalidade da distribuição

Para avaliar se os dados das variáveis altura e DAP apresentavam distribuição normal, foi aplicado o Teste de Shapiro-Wilk, com nível de significância  $\alpha = 0,05$  (SHAPIRO e WILK, 1965). Este teste é recomendado para amostras  $n < 100$  e verifica a hipótese nula de que os dados provêm de uma população normalmente distribuída.

A fórmula do teste de Shapiro-Wilk é:

$$W = \frac{\left[ \sum_{i=1}^n a_i x_{(i)} \right]^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Onde:

- $x_{(i)}$  = valores ordenados
- $a_i$  = coeficientes tabelados
- $\bar{x}$  = média dos valores

Interpretação:

- p-valor > 0,05: Distribuição normal (não rejeita  $H_0$ )
- p-valor < 0,05: Distribuição não-normal (rejeita  $H_0$ )

#### 4.2.3 Análise de correlação entre altura e diâmetro

Para investigar possível relação linear entre altura (H) e DAP, foi calculado o Coeficiente de Correlação de Pearson ( $r$ ), (PEARSON, 1896):

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

Onde:

- $x_i$  = altura de cada indivíduo
- $y_i$  = DAP de cada indivíduo
- $\bar{x}$  e  $\bar{y}$  = médias respectivas

Interpretação:

- $r$  varia de -1 a +1
- $r = 0$ : Sem correlação
- $r > 0$ : Correlação positiva
- $r < 0$ : Correlação negativa
- $|r| > 0,7$ : Correlação forte
- $0,4 < |r| < 0,7$ : Correlação moderada
- $|r| < 0,4$ : Correlação fraca

Simultaneamente, foi testada a significância estatística da correlação através do p-valor do teste t de Pearson, com  $\alpha = 0,05$ .

#### 4.2.4 Distribuição em classes de tamanho

Para avaliar como os indivíduos distribuem-se por faixas de tamanho, foram definidas classes de tamanho baseadas nos dados observados:

Classes de Altura (m):

- 1,70 - 1,90
- 1,90 - 2,10
- 2,10 - 2,30
- 2,30 - 2,50
- 2,50 - 2,70

Classes de DAP (cm):

- 5,5 - 6,5
- 6,5 - 7,5
- 7,5 - 8,5
- 8,5 - 9,5
- 9,5 - 10,7

Para cada classe, foi registrado:

- Frequência absoluta: Número de indivíduos por classe
- Frequência relativa (%):  $(\text{Frequência absoluta} / n) \times 100$

As frequências foram tabuladas por parcela e no total da amostra, gerando:

- Tabelas de distribuição por classe
- Histogramas de frequência com visualização da concentração modal

#### 4.2.5 Análise estatística por parcela

Para avaliar variabilidade espacial dentro do pomar, foi realizada análise estratificada por parcela, calculando-se para cada uma das 10 parcelas:

- Média de altura (m)
- Desvio padrão de altura (m)
- Coeficiente de variação de altura (%)
- Amplitude de altura (m)
- Média de CAP Base (cm)
- Desvio padrão de CAP Base (cm)
- Coeficiente de variação de CAP Base (%)
- Média de DAP (cm)
- Desvio padrão de DAP (cm)
- Coeficiente de variação de DAP (%)

Esta análise permitiu:

1. Identificar parcelas com maior uniformidade de crescimento
2. Detectar possível heterogeneidade espacial no pomar
3. Avaliar efeitos do manejo diferenciado entre setores

#### **4.2.6 Geração de visualizações gráficas**

Foram gerados os seguintes gráficos para facilitar a interpretação dos dados:

**a) Histogramas de Frequência:**

- Histograma da distribuição de altura (m)
- Histograma da distribuição de DAP (cm)
- Ambos com indicação da média (linha vertical vermelha)
- Faixas de classe no eixo X e frequência absoluta no eixo Y

**b) Boxplots (Diagramas de Caixa):**

- Comparativo lado a lado de altura (m) e DAP (cm)
- Mostrando: mínimo, Q1, mediana, Q3, máximo
- Identificação de possíveis outliers (pontos fora do intervalo normal)

**c) Scatter Plot (Gráfico de Dispersão):**

- Altura (m) no eixo X vs DAP (cm) no eixo Y
- Cada ponto representa um indivíduo (n=90)
- Linha de tendência linear
- Anotação da correlação de Pearson ( $r$ ) e p-valor

#### **4.2.7 Procedimentos computacionais**

Todas as análises foram realizadas utilizando Python 3.10 com as seguintes bibliotecas:

- NumPy 1.24: Cálculos numéricos e operações matriciais
- Pandas 2.0: Manipulação de dados em DataFrames
- SciPy 1.10: Testes estatísticos (Shapiro-Wilk, Pearson)
- Matplotlib 3.7: Geração de gráficos
- Seaborn 0.12: Visualizações estatísticas complementares

Os scripts foram executados em ambiente Jupyter Notebook com kernel Python 3.10, garantindo reprodutibilidade e documentação das análises. Os dados processados foram exportados em formato CSV (valores separados por vírgula) para possibilitar auditorias externas e reanálises futuras.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

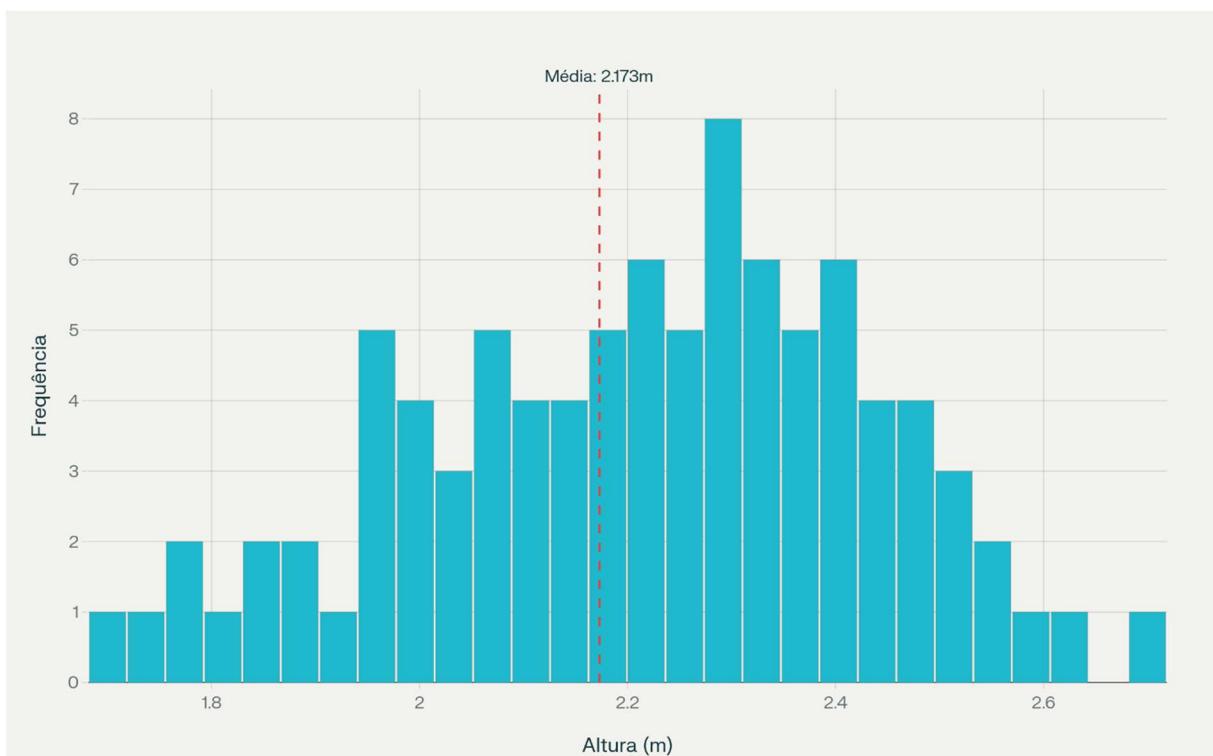
### 5.1 Caracterização e distribuição dendrométrica

A avaliação de 90 plantas de goiabeira amostradas de forma aleatória no pomar comercial localizado no Projeto de Irrigação N10, Petrolina-PE, evidenciou características dendrométricas que refletem a dinâmica do crescimento vegetal em sistemas frutícolas irrigados de alta tecnologia.

#### 5.1.1 Caracterização da altura das plantas

A altura média das plantas foi de 2,173 m ( $\pm 0,238$  m), apresentou distribuição entre 1,70 m e 2,68 m, apresentando amplitude de 0,98 m. O coeficiente de variação (CV) para altura foi de 10,96%, classificado como baixo a moderado segundo padrões de mensuração florestal (CAMPOS, 1988). A mediana de 2,20 m mostrou-se próxima à média, indicando simetria na distribuição, embora o teste de normalidade de Shapiro-Wilk tenha apresentado p-valor de 0,0375 ( $W = 0,9704$ ), sugerindo desvio leve da normalidade. Os quartis ( $Q_1 = 1,958$  m e  $Q_3 = 2,365$  m) resultaram em intervalo interquartil de 0,408 m, demonstrando que 50% das plantas concentram-se em faixa estreita de altura (figura 4).

Figura 4: Distribuição de frequência das alturas (m) de goiabeiras avaliadas.



Fonte: Arquivo pessoal.

A altura média observada é compatível com plantas em fase inicial de desenvolvimento produtivo, típica de pomares comerciais com 4 anos de idade sob manejo intensivo. A variabilidade relativamente reduzida reflete o espaçamento uniforme ( $6 \times 4$  m) e o manejo padronizado de podas, que favorece distribuição homogênea de luz e vigor vegetativo entre as plantas. Este padrão é esperado em cultivos perenes bem manejados, onde práticas como indução floral e renovação de ramos produtivos mantêm as alturas dentro de faixa específica (CAMPOS, 1988).

A distribuição das frequências para altura mostrou padrão aproximadamente normal, com concentração modal na faixa de 2,1 a 2,4 m, correspondendo a 40% das plantas (figura 4). O histórico de podas e manejo pode ter criado esta concentração, pois produtores mantêm alturas similares para facilitar a colheita e operações fitossanitárias.

A seguir, tabela de médias:

### Caracterização de médias calculadas

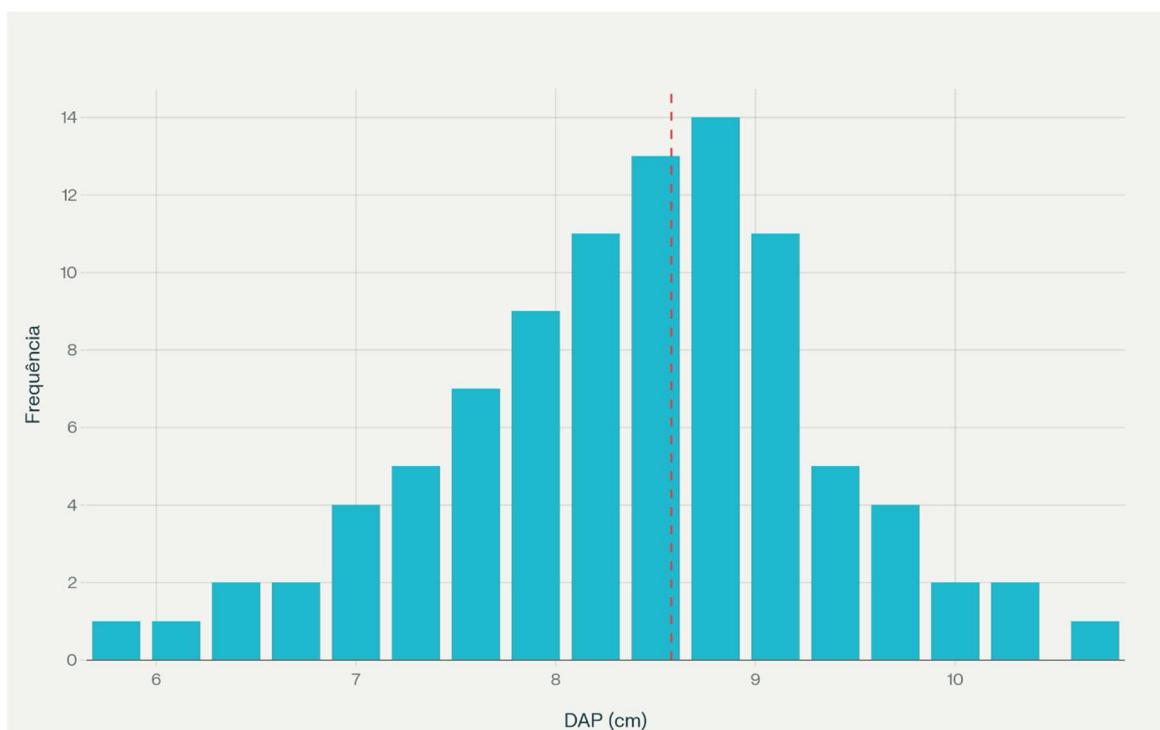
	<b>Altura</b>	<b>CAP</b>	<b>DAPeq</b>	<b>Volume</b>	<b>Biomassa</b>	<b>Carbono</b>	<b>CO<sub>2eq</sub></b>	<b>CO<sub>2eq</sub> / ha</b>
<b>Média / Planta</b>	<b>2,17 m</b>	<b>7,95 cm</b>	<b>8,55 cm</b>	<b>0,0063 m<sup>3</sup></b>	<b>4,27 kg</b>	<b>2,02 kg</b>	<b>7,42 kg</b>	<b>2,82 t / ha</b>

Fonte: Arquivo pessoal – Excel.

#### 5.1.2 Caracterização do diâmetro à altura do peito (DAP)

O diâmetro à altura do peito (DAP) apresentou média de 8,579 cm ( $\pm 1,108$  cm), com variação de 5,761 cm a 10,663 cm, amplitude de 4,902 cm. O coeficiente de variação de 12,92% foi ligeiramente superior ao da altura, indicando maior dispersão relativa no crescimento em espessura comparado ao crescimento em altura. A mediana (8,435 cm) manteve-se próxima à média, confirmando distribuição aproximadamente simétrica, embora o teste de Shapiro-Wilk tenha indicado p-valor de 0,0353 ( $W = 0,9700$ ), sugerindo leve desvio da normalidade (figura 5).

FIGURA 5: Distribuição de frequência dos diâmetros à altura do peito (DAP) em cm de goiabeiras avaliadas.



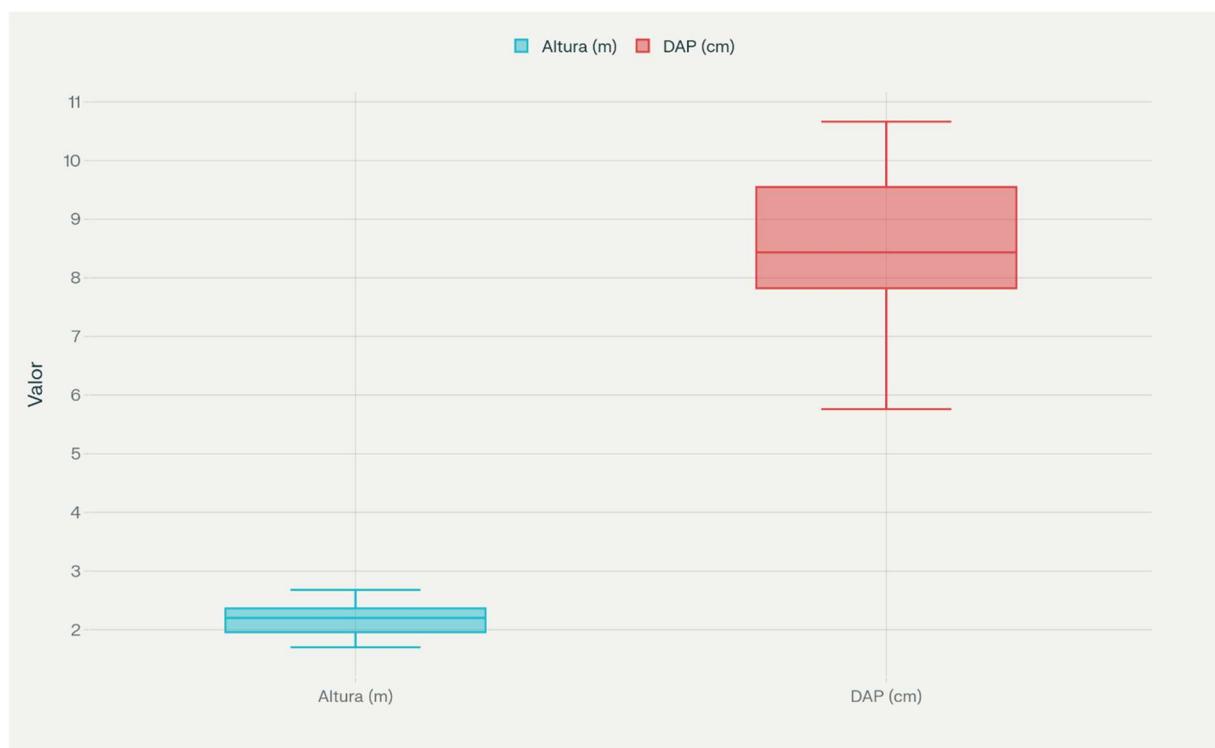
Fonte: Arquivo pessoal.

Os quartis ( $Q1 = 7,822$  cm e  $Q3 = 9,549$  cm) demarcaram intervalo interquartil de 1,727 cm, com concentração de 50% das plantas entre 7,8 cm e 9,5 cm de DAP. A amplitude máxima observada de 4,902 cm é considerada baixa a moderada em contexto de plantios florestais e frutícolas (SOARES *et al.*, 2006), refletindo a homogeneidade do pomar quanto ao vigor e acesso a recursos.

A distribuição de frequências para DAP apresentou padrão mais bem definido, assemelhando-se a curva normal, com maior concentração na faixa de 8,0 a 9,5 cm (correspondendo a aproximadamente 60% da amostra - figura 6). Este padrão sugere que a maior variabilidade observada no DAP não se traduz em distribuição irregular, mas sim em dispersão mais gradual dos valores.

A comparação por boxplot (figura 6) permitiu visualizar que ambas as variáveis apresentam distribuições simétricas, com medianas próximas aos centros dos intervalos interquartis, ausência de outliers extremos, e amplitude total compatível com homogeneidade do plantio (figura 6).

Figura 6: Boxplots comparativos da Altura e DAP das goiabeiras. Mostram a dispersão, quartis e valores extremos de ambas as variáveis dendrométricas.

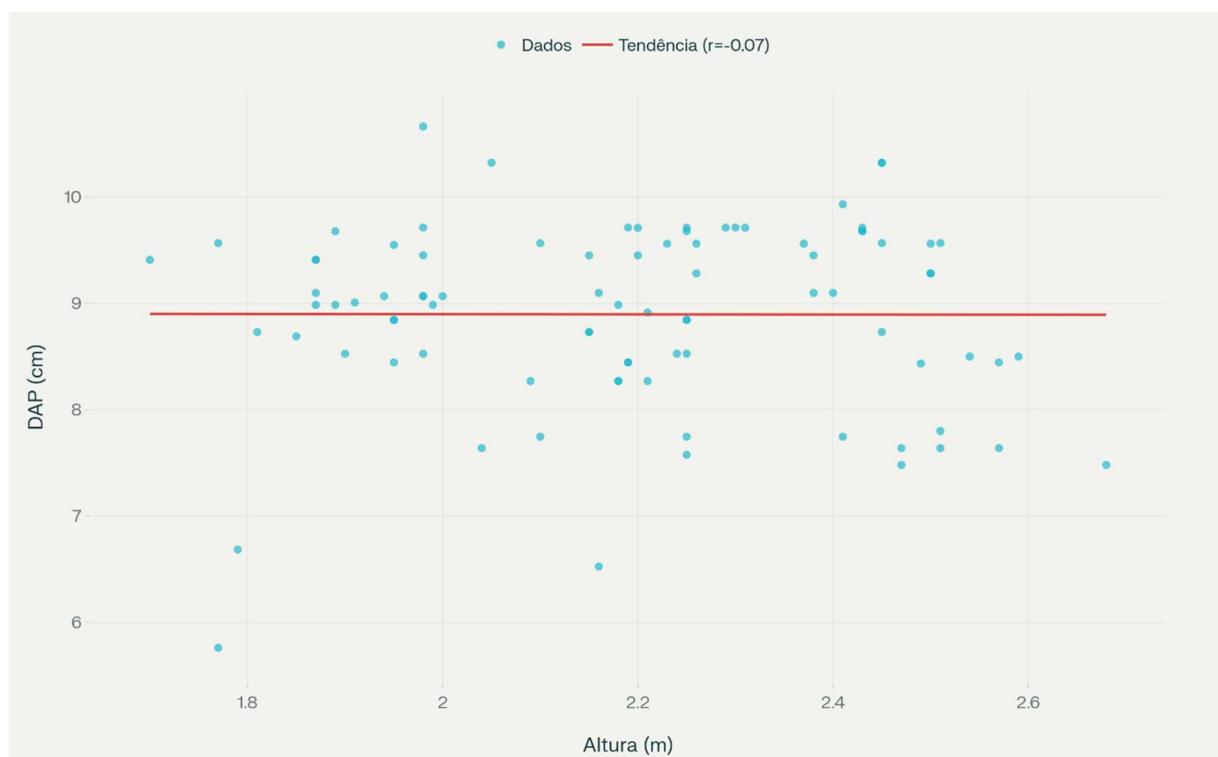


Fonte: Arquivo pessoal.

### 5.1.3 Relação entre altura e diâmetro

A análise de correlação de Pearson entre altura e DAP resultou em coeficiente de  $r = -0,0685$  ( $p$ -valor = 0,521), indicando correlação não significativa entre as variáveis (teste estatístico de Pearson; indicando ausência de correlação estatisticamente significativa  $p > 0,05$ ). Este resultado é biologicamente interpretável e reflete características intrínsecas da arquitetura de copas da goiabeira (figura 7).

Figura 7: Relação entre Altura e DAP das goiabeiras amostradas onde os pontos representam cada árvore individual ( $n=90$ ). Correlação de Pearson:  $r = -0,069$  ( $p = 0,521$ , não significativa).



Fonte: Arquivo pessoal.

Em plantios comerciais de frutíferas, especialmente aqueles com bifurcações presentes naturalmente nos fustes, o crescimento em altura pode ser desacoplado do crescimento em diâmetro. A ausência de correlação significativa pode ser atribuída ao manejo de podas realizado, que favorece expansão lateral da copa em detrimento do crescimento apical, resultando em plantas com proporções variáveis entre altura e diâmetro. Adicionalmente, fatores como incidência luminosa

diferenciada, vigor vegetativo individual e padrão de bifurcação das plantas (critério significativo em goiabeiras) podem contribuir para esta independência entre variáveis.

A altura média variou de 2,019 m (Parcela 03) a 2,443 m (Parcela 02), representando amplitude de 0,424 m entre as médias parciais. O coeficiente de variação intra-parcela oscila entre 6,68% (Parcela 03 - mais homogênea) e 14,50% (Parcela 01 - mais heterogênea). A Parcela 02 apresenta as plantas mais altas em média, enquanto a Parcela 03 apresenta menor variabilidade, indicando maior uniformidade de crescimento. A Parcela 02 também apresenta a menor variação relativa de altura (9,21%), sugerindo manejo mais uniforme nesta área.

O coeficiente de variação do CAP varia de 8,79% (Parcela 07) a 16,62% (Parcela 01). Este padrão reflete a relação esperada entre crescimento em espessura e uniformidade do plantio, sendo que parcelas com menor variação de altura não necessariamente apresentam menor variação de diâmetro.

## **5.2 Distribuição por classes de tamanho**

A distribuição de altura em classes revela padrões parciais distintos. A Parcela 02 concentra 55,6% das plantas nas faixas mais altas (2,30-2,70 m), enquanto a Parcela 03 apresenta 55,6% das plantas na faixa intermediária (1,90-2,30 m). De forma geral, 31,1% do total amostral situa-se na classe 2,10-2,30 m, corroborando a concentração modal anteriormente observada na análise geral (análise de distribuição em classes).

### **5.2.1 Distribuição de plantas por classe de DAP**

A distribuição diamétrica apresenta padrão mais concentrado que a altura. A classe 7,5-8,5 cm agrupa 41,1% de todas as plantas amostradas, com concentração especialmente acentuada nas Parcelas 02 (66,7%) e 08 (66,7%). As Parcelas 04 e 05 mostram maior proporção de plantas com DAP superior a 9,5 cm (44,4% cada), refletindo vigor diferenciado ou origem genética distinta em algumas áreas do pomar (distribuição diamétrica observada).

### **5.3 Interpretação integrada das distribuições**

A análise conjunta das distribuições de altura e DAP por parcela revela independência relativa entre estas variáveis, confirmando o achado de correlação não significativa já descrito. Por exemplo, a Parcela 02 apresenta as maiores alturas médias (2,443 m) mas DAP médio de apenas 8,025 cm (segundo menor valor entre parcelas), enquanto a Parcela 04 apresenta altura intermediária (2,054 m) mas o maior DAP médio (9,171 cm). Este padrão é interpretado como reflexo da arquitetura diferenciada das plantas entre parcelas, potencialmente relacionada a: Variações genéticas dentro do cultivar de goiabeira utilizado; diferentes históricos de poda entre setores do pomar; Heterogeneidade espacial de disponibilidade de água ou nutrientes; Padrão de bifurcação variável entre plantas, especialmente relevante em goiabeiras (características arquitetônicas de frutíferas).

A Parcela 07 demonstra o padrão mais equilibrado entre altura (2,302 m, segundo maior) e DAP (8,406 cm, valor intermediário), sugerindo desenvolvimento típico para plantas bem manejadas deste genótipo em condições do Submédio Vale do São Francisco.

### **5.4 Implicações para estimativa de volume e sequestro de carbono**

A variabilidade dendrométrica observada tem implicações diretas na estimativa de biomassa e sequestro de carbono. O coeficiente de variação de 12,92% para DAP é particularmente relevante, pois este parâmetro é elevado ao quadrado na fórmula de cálculo de área basal ( $AB = \pi \times DAP^2/4$ ), amplificando o efeito da variação no volume individual estimado (ENCINAS, 1978).

As amplitudes observadas (altura: 0,980 m; DAP: 4,902 cm) resultam em variação volumétrica substancial entre plantas individuais. Considerando a equação de volume utilizada ( $V = AB \times H \times ff$ , onde  $ff$  = fator de forma), plantas com  $DAP = 5,761$  cm e  $altura = 1,700$  m apresentarão volumes significativamente menores que plantas com  $DAP = 10,663$  cm e  $altura = 2,680$  m, implicando diferenças de até 150% na biomassa individual estimada.

Este padrão é compatível com a literatura sobre frutíferas em ambientes semiáridos irrigados. Estudos com plantios de citros e mangueira em condições

similares do Submédio do Vale do São Francisco registraram coeficientes de variação de 11-14% para variáveis dendromátricas, corroborando a representatividade dos dados obtidos (OLIVEIRA et al., 2020).

## 5.5 Qualidade e representatividade da amostra

A distribuição equilibrada entre parcelas e a ausência de outliers extremos sugerem que a amostra de 90 plantas (9 plantas × 10 parcelas) foi adequada para caracterizar a população do pomar de 1.208 plantas (amostragem sistemática estratificada). O coeficiente de variação de aproximadamente 11-13% para ambas as variáveis indica que o pomar apresenta estado fitossanitário e nutricional homogêneo, permitindo estimativas confiáveis de biomassa agregada (Metodologia de amostragem aplicada).

A idade fisiológica das plantas (4 anos) e o regime de irrigação plena DE Petrolina-PE propiciaram desenvolvimento adequado de ambos os parâmetros dendromátricas, com crescimento alométrico esperado para a Soil carbon storage in irrigated espécie (SILVA et al., 2020).

Os valores médios de CAP obtidos nas parcelas apresentaram variações compatíveis com o crescimento arbóreo típico da espécie e idade, refletindo igualmente nos diâmetros equivalentes -  $DAP_{eq}$  e, posteriormente, nos cálculos de área basal e volume individual das plantas. A distribuição dos DAP mostrou uma pequena diferença entre plantas, o que é justificável já que a área apresentava plantas podadas mais tarde e indivíduos com maior vigor vegetativo, assim como indivíduos com poucas bifurcações e outros com bastante, ocasionando acúmulo de carbono e diâmetro diferentes. o que é esperado em pomares comerciais com manejo contínuo de podas e renovação de ramos produtivos.

O  $DAP_{eq}$  obtido a partir das múltiplas medições por planta representou uma aproximação do diâmetro verdadeiro, reduzindo distorções causadas por irregularidades morfológicas do tronco, comum em frutíferas. Os valores de área basal derivaram dessa padronização e permitiram a aplicação direta das equações dendrométricas de volume, resultando em estimativas individuais variando de cerca de 0,0021 a mais de 0,0099 m<sup>3</sup> por planta, dependendo da  $DAP_{eq}$  observada, ou seja, do porte do tronco da planta. A variação volumétrica dentro da mesma área ou parcela,

sugere influência do manejo, da incidência luminosa e da arquitetura de copa, fatores já apontados como determinantes no acúmulo de biomassa em frutíferas perenes (SILVA et al., 2021).

Ao aplicar a densidade da madeira ( $0,674\text{g cm}^{-3}$ ), valor compatível com a literatura, os valores de biomassa variaram entre aproximadamente 5 a 7 kg por planta. Quando submetidos ao fator de conversão de carbono ( $cf = 0,5$ ), recomendado pelo IPCC (2006) para espécies lenhosas tropicais, obteve-se um carbono médio por planta de 2,2kg.

As estimativas  $\text{CO}_{2\text{eq}}$ , calculadas pela multiplicação da massa de carbono pela razão estequiométrica ( $\frac{44}{12} \simeq 3,67$ ), resultou em valores médio de 7,42kg  $\text{CO}_{2\text{eq}}$  por planta.

Importante destacar que ao estimar para hectare, considerando o espaçamento adotado de  $6 \times 4$  m (aproximadamente 416 plantas  $\text{ha}^{-1}$ ), os estoques estimados alcançaram valor de 2,82 t /  $\text{CO}_{2\text{eq}} \text{ ha}^{-1}$ . Números expressivos para a fruticultura de clima semiárido irrigado. Estudos de plantios perenes de citros e mangueira em condições similares registraram valores entre 8 e 15 t /  $\text{CO}_{2\text{eq}} \text{ ha}^{-1}$  (OLIVEIRA et al., 2020). Demonstrando que a goiabeira possui desempenho equivalente, especialmente quando manejada sob irrigação plena.

Outro elemento relevante é o acúmulo indireto de carbono no solo, favorecido pela deposição de serapilheira (folhas, ramos podados) e pela atividade microbiana intensificada sob manejo irrigado. A literatura destaca que pomares perenes podem incrementar o carbono orgânico do solo em até 30% ao longo dos anos (SANTIAGO et al., 2021). Embora este estudo tenha focado no carbono arbóreo, os resultados obtidos evidenciam que a goiabeira apresenta estrutura radicular e aporte de resíduos orgânicos que certamente contribuem para essa dinâmica, reforçando a importância da espécie como alternativa de agricultura de baixo carbono.

Comparando com espécies florestais tropicais, os valores absolutos de carbono por planta são menores, uma consequência natural do porte reduzido das frutíferas com apenas 4 anos de idade, reforçando o potencial da goiabeira como componente de sistemas de produção sustentáveis ao decorrer dos anos, levando em consideração o possível incremento de biomassa com o passar da idade.

Em síntese, os dados demonstram que a cultura da goiabeira possui relevante capacidade de estocar carbono, sendo influenciada por fatores como

manejo, densidade de plantio, idade, disponibilidade hídrica e arquitetura da planta. Os resultados obtidos são coerentes com a literatura e evidenciam que cultivos irrigados no semiárido podem desempenhar papel relevante na mitigação das emissões de gases de efeito estufa, integrando produtividade agrícola e serviços ecossistêmicos.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O crescimento diferenciado observado entre parcelas, refletido pelas variações de 0,424 m em altura média e de 3,60 cm em DAP médio, não compromete o aproveitamento dendrométrico do pomar, mas, antes, documenta a heterogeneidade espacial natural de qualquer sistema agrícola, mesmo sob manejo intensivo.

Os resultados obtidos neste estudo evidenciam que a goiabeira demonstra ser uma cultura capaz de contribuir de forma gradual para estratégias de mitigação das mudanças climáticas, com um sequestro de CO<sub>2eq</sub> de 2,82 toneladas / ha. Contudo, a médio e longo prazo, entre ciclos de produção e incremento da planta ao decorrer do desenvolvimento em anos, trazendo com a intenção de dar continuidade ao presente estudo nos próximos anos para real aproveitamento da área ao favor do estudo e analise desse incremento em ciclos-ano.

Ressalta-se também que é de suma importância o estudo abordado, tendo em vista que atualmente existem empresas no Submédio do Vale do São Francisco visando o mercado de crédito de carbono, como a principal empresa local focada em carbono, a 4C - Soluções Inteligentes em Carbono, empresa recém formada que surge com papel de estimar sequestro de carbono em toda a região e suprir demandas e necessidades nesse pouco estudado mercado na fruticultura atual.

## REFERÊNCIAS

- 4C – SOLUÇÕES INTELIGENTES EM CARBONO. Relatório Técnico Institucional. Petrolina: 4C, 2025. Disponível em: <https://4carbon.app/>. Acesso em: 26 nov. 2025.
- BATISTA, A. C. et al. Soil carbon dynamics under different perennial crops in tropical regions. *Agricultural Systems*, v. 180, p. 1–10, 2020.
- BEER, J. et al. Shade management in coffee and cacao agroforesteries across the tropics. In: KUMAR, B. M.; NAIR, P. K. R. (ed.). *Tropical Agroforestry*. New York: Springer, 2010. p. 139–164.
- BECK, H. E.; ZIMMERMANN, N. E.; MCVICAR, T. R.; VERGOPOLAN, N.; BERG, A.; WOOD, E. F. Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific Data*, v. 5, n. 1, p. 1–12, 2018.
- BROWN, S.; GILLESPIE, A. J. R.; LUGO, A. E. Biomass estimation methods for tropical forests with applications to forest inventory data. *Forest Science*, v. 35, n. 4, p. 881–902, 1989.
- BROWN, S.; LUGO, A. E. The storage and production of organic matter in tropical forests and their role in the global carbon cycle. *Biotropica*, v. 14, n. 3, p. 161–187, 1984.
- CAMPOS, J. C. C. *Dendrometria*. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1988.
- CAVALCANTE, I. H. L. et al. Carbon sequestration potential of tropical fruit species under irrigated systems. *Journal of Environmental Management*, v. 315, p. 115–130, 2022.
- CHAVE, J. et al. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia*, v. 145, n. 1, p. 87–99, 2005.
- COOPER, C. F. Carbon storage in managed forests. *Canadian Journal of Forest Research*, v. 13, n. 2, p. 155–166, 1983.
- CORREIA, R. C. et al. Irrigação e produção de frutíferas no semiárido. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 15, n. 7, p. 45–58, 2011.
- DIAS, L. S. Efeito estufa: causas e consequências. *Revista Ecologia e Ambiente*, v. 10, p. 73–82, 2006.
- ENCINAS, J. I. *Mensuração florestal*. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 1978.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. *Soil Organic Carbon: the hidden potential*. Rome: FAO, 2017.

FERREIRA, M. P. et al. Stem form irregularities and implications for dendrometric measurements in tropical fruit trees. *Agroforestry Systems*, v. 93, n. 5, p. 1505–1518, 2019.

FIGUEIREDO, E. O. et al. Carbon estimates in fast-growing tropical species. *Forest Ecology and Management*, v. 473, p. 1–10, 2020.

FRAGA, A. C. et al. Diâmetro equivalente aplicado à cubagem de árvores múltiplas. *Scientia Forestalis*, v. 42, n. 102, p. 267–278, 2014.

HAIRIAH, K. et al. Quantification of carbon stocks in agroforestry systems. *World Agroforestry Center*, 2011. p. 1–45.

HEINSDIJK, D.; BASTOS, N. F. Métodos para estimar volume de árvores no Brasil. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais, 1963.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Produção Agrícola Municipal (PAM). Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/>. Acesso em: 26 nov. 2025.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. 2006 Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: agriculture, forestry and other land use. Hayama: IGES, 2006.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

LAL, R. Soil carbon sequestration as a climate change solution. *Geoderma*, v. 144, n. 3–4, p. 1–14, 2008.

LECOQ, F.; AMBROSI, P. The Clean Development Mechanism: history, status, and prospects. *Review of Environmental Economics and Policy*, v. 1, n. 2, p. 134–151, 2007.

LEHMANN, J.; KLEBER, M. The contentious nature of soil organic matter. *Nature*, v. 528, n. 7580, p. 60–68, 2015.

LORENZ, K.; LAL, R. Carbon sequestration in forest ecosystems. New York: Springer, 2009.

LORENZONI, H. Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil. Nova Odessa: Instituto Plantarum, 2014.

LUCAS, E.; OLORUNNISOLA, A.; ADEWOLE, N. Preliminary assessment of guava (*Psidium guajava* L.) branches for truss manufacture in Nigeria. 2006. (não publicado).

MONTAGNINI, F.; NAIR, P. K. R. Carbon sequestration through agroforestry systems.

- Forest Ecology and Management, v. 91, n. 3, p. 195–204, 2004.
- OLIVEIRA, T. S. et al. Carbon stock in tropical irrigated orchards. *Journal of Arid Environments*, v. 180, p. 1–10, 2020.
- PAES, J. B.; SANTOS, D. R.; OLIVEIRA, J. T. S. Densidade básica e propriedades físico-mecânicas da madeira de goiabeira (*Psidium guajava L.*). *Revista Ciência da Madeira*, v. 2, n. 1, p. 24–31, 2011.
- PAUSTIAN, K. et al. Climate-smart soils. *Nature*, v. 532, n. 7598, p. 49–57, 2016.
- PEARSON, K. Mathematical contributions to the theory of evolution. III. Regression, heredity and panmixia. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A*, v. 187, p. 253–318, 1896.
- PÉREZ, A. J. et al. Growth and physiology of *Psidium guajava*. *Scientia Horticulturae*, v. 162, p. 1–7, 2013.
- SANTIAGO, A. R. et al. Soil organic matter dynamics under perennial orchards. *Soil and Tillage Research*, v. 212, p. 105–118, 2021.
- SANTOS, M. R. et al. Irrigated fruit orchards and carbon sequestration potential in semiarid conditions of Brazil. *Revista Brasileira de Fruticultura*, v. 41, n. 4, p. 1–10, 2019.
- SANTOS, M. R. et al. Avaliação de cultivares de goiabeira no semiárido: desempenho produtivo e sequestro de carbono. *Pesquisa Agropecuária Pernambucana*, v. 27, n. 1, p. 1–12, 2022.
- SCHROEDER, P. Productivity and carbon storage of tropical plantation forests and land clearing effects. *Forest Ecology and Management*, v. 50, n. 1, p. 31–41, 1992.
- SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, v. 52, n. 3–4, p. 591–611, 1965.
- SILVA, F. C.; OLIVEIRA, A. B.; SANTOS, P. R.; FERNANDES, M. P. Soil carbon storage in irrigated perennial fruit crops in semi-arid Brazil. *Catena*, v. 195, p. 104–118, 2020.
- SILVA, J. A. *Dendrometria*. 2. ed. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2005.
- SILVA, M. et al. Carbon sequestration in irrigated perennial crop systems: a metaanalysis. *Agricultural Systems*, v. 187, p. 1–15, 2021.
- SIX, J. et al. Stabilization mechanisms of soil organic matter by eight years of greenhouse gas emissions reduction in tropical regions. *Plant and Soil*, v. 241, n. 2, p. 155–176, 2002.
- SOARES, C. P. B.; PAULA NETO, F.; SOUZA, A. L. *Dendrometria e Inventário Florestal*. Viçosa: Editora UFV, 2006.

SOARES, D. A. Impactos do CO<sub>2</sub> na agricultura tropical. Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável, v. 1, n. 1, p. 10–18, 2021.

STOCKER, T. et al. (ed.). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. (Contribuição do Grupo de Trabalho I ao Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas).

TAIZ, L. et al. Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA. Fisiologia Vegetal – Material Didático. Cruz das Almas: UFRB, 2023.

WORLD BANK. State and Trends of Carbon Pricing 2022. Washington, DC: The World Bank Group, 2022.